

Lane Medical Library

○NDERZOEKINGEN OVER
BOVENTONEN BIJ
STEMVORKEN



P. HACQUEBORD

Groningen

ONDERZOEKINGEN OVER
BOVENTONEN BIJ STEMVORKEN.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

ONDERZOEKINGEN OVER BOVENTONEN BIJ STEMVORKEN

PROEFSCHRIFT

TER VERKRIJGING VAN DEN GRAAD VAN DOCTOR
IN DE GENEESKUNDE AAN DE RIJKS-UNIVERSITEIT
TE GRONINGEN, OP GEZAG VAN DEN RECTOR-
MAGNIFICUS MR. H. VAN GOUDOEVER, HOOGLEERAAR
IN DE FACULTEIT DER RECHTSGELEERDHEID, TEGEN
DE BEDENKINGEN VAN DE FACULTEIT DER GE-
NEESKUNDE TE VERDEDIGEN OP WOENSDAG
5 JULI 1933, DES NAMIDDAGS OM 4 UUR,

DOOR

PIETER HACQUEBORD, ARTS
GEBOREN TE DRACHTEN

BIJ J. B. WOLTERS' UITGEVERS-MAATSCHAPPIJ N.V.
GRONINGEN — DEN HAAG — BATAVIA — 1933

AAN DE NAGEDACHTENIS VAN MIJN MOEDER.
AAN MIJN VADER.
AAN MIJN VERLOOFDE.

Bij het verschijnen van dit proefschrift is het mij een behoefte om U, Hoogleeraren, Oud-Hoogleeraren en Lectoren der wis- en natuurkundige en geneeskundige faculteiten te Groningen en U allen die mijn leermeesters zijt geweest, mijn dank te betuigen voor het onderricht dat ik van U mocht ontvangen.

Den grootsten dank ben ik U wel schuldig, Hooggeleerde Benjamins, Hooggeachte Promotor! Ik beschouw het als een groot voorrecht, dat ik mij onder Uw uitmuntende klinische leiding heb kunnen vormen tot keel-, neus- en oorarts. Ik dank U voor de gelegenheid, die Gij mij geschonken hebt om gedurende drie jaren als assistent Uwer kliniek werkzaam te zijn en voor de voorlichting mij bij het bewerken van dit proefschrift verleend. Uw groote werkkraft en vaardigheid hoop ik in de toekomst steeds als voorbeeld voor oogen te houden.

Zeergeleerde Eelco Huizinga, een belangrijk gedeelte van mijn opleiding dank ik aan U. Gij hebt mij daardoor ten zeerste aan U verplicht.

Mijn mede-assistenten dank ik voor hun collegiale samenwerking. In 't bijzonder ben ik U, Zeergeleerde Huizing, grooten dank verschuldigd voor de offerende wijze, waarop Gij mij bij mijn onderzoek hebt bijgestaan, voor Uw vele aanwijzingen bij de proeven en voor alle blijken van belangstelling, die ik van U mocht ontvangen.

De Hoofdverpleegster Zr. Mag n i n en allen met wie

ik het voorrecht had in het Academisch Ziekenhuis samen te werken, ben ik zeer erkentelijk voor de aangename wijze, waarop dit steeds kon geschieden.

Zeër geachte Mejuffrouw Benjamin s, ik betuig U mijn dank voor de hulpvaardigheid die ik van U mocht ondervinden.

Waarde Volkman n, Uw hulp bij het technisch gedeelte van mijn onderzoek wordt door mij zeer gewaardeerd.

INHOUD.

	Blz.
Inleiding	1
Hoofdstuk I. <i>Vroegere onderzoekingen over boventonen bij stemvorken.</i>	
§ 1. Niet-harmonische boventonen	4
§ 2. Harmonische boventonen	8
§ 3. De invloed van de stemvorkbevestiging op het optreden der boventonen	16
Hoofdstuk II. <i>Eenige opmerkingen over het optreden van boventonen van boventonen bij verschillende instrumenten in gebruik bij het gehooronderzoek.</i>	
§ 1. Inleiding	21
§ 2. Stemvorken	22
§ 3. Fluitje vlg. Galton-Edelmann	25
§ 4. Monochord in longitudinale trilling	29
§ 5. Monochord in transversale trilling	31
§ 6. Klankstaven	32
§ 7. Electriscbe toongeneratoren	34
Hoofdstuk III. <i>Een bijzondere toepassing van stemvork-aandrijving door middel van een triode. Beschrijving van de proefopstelling.</i>	
§ 1. Inleiding	37
§ 2. Toepassing der triode	39
§ 3. Registratie der niet-harmonische boventonen	43
§ 4. Registratie der trillingen van beide stemvorkbeenen	47
§ 5. Een andere methode	49

H o o f d s t u k IV. *Eigen onderzoeken over boventonen bij stemvorken.*

§ 1.	Onderzoeken bij omgebogen staven .	52
§ 2.	Onderzoeken bij stemvorken van Edelmann	62
§ 3.	Verschil in toonzuiverheid bij stemvorktrilling door electrische aandrijving en door aanslaan	66
§ 4.	Invloed van de looppengewichten op het optreden der niet-harmonische boventonen .	70
§ 5.	De harmonische boventonen	71
§ 6.	Samengestelde trillingen	73
H o o f d s t u k V. Samenvatting		75

INLEIDING.

De meest bekende geluidsbronnen brengen, zooals bekend is, niet alleen den grondtoon voort doch tevens een aantal boventonen. Bij het aanslaan van een toets op de piano, het aanblazen van een orgelpijp, het aanslaan van een stemvork ontstaat een toon, die bv. als c^1 wordt aangegeven. In werkelijkheid hoort men echter niet één enkelvoudigen toon, maar een groot aantal. Van deze tonen geeft de grondtoon gewoonlijk de krachtigste geluidsgewaarwording. Dit is echter niet altijd het geval; bij het voortbrengen van lage tonen hoort men bij verschillende geluidsbronnen de boventonen luider dan den grondtoon.

Bij het gehooronderzoek is het vraagstuk, in hoeverre de geluidsbron een zuiveren, enkelvoudigen toon geeft daarom van zooveel belang omdat boventonen aanleiding kunnen zijn tot fouten bij dit onderzoek. Deze misleidende resultaten treden gemakkelijk op wanneer men het gehoor op lage tonen onderzoekt of wanneer men bepalingen doet omtrent de boven- of benedengrens van het gehoor of ook wanneer er bij de waarneming sprake is van zg. „geluidseilanden” of van „geluidshiaten”.

Bij de *stemvork* treden naast den grondtoon *harmonische* en *niet-harmonische* boventonen op. Nu is ons gehoororgaan hierbij in 't algemeen wel in staat de betrekkelijk hooge, niet-harmonische boventonen naast den grondtoon afzonderlijk waar te nemen. Dit onderscheidingsvermogen is minder goed mogelijk bij de harmonische boventonen, die zich tot den grondtoon verhouden als 2 en 1 (octaaf), als 3 en 1 (duodecime), enz. Het onderzoek

over deze ineenvloeiing bij de waarneming werd gedaan (Stumpf) in het gebied der toonladder waarvoor het menschelijk oor het gevoeligst is (c^2 — c^5).

De gevoeligheid van het gehoor neemt voor de lagere tonen sterk af. Het is nu mogelijk dat de boventonen beter worden waargenomen dan de grondtoon. Hiermee dient men vooral rekening te houden bij het gehooronderzoek met stemvorken waarbij de grondtoon (n_0) lager is dan G (96). Wanneer een patiënt het geluid van een stemvork C ($n_0 = 32$) nog juist hoort is hiermee de benedengrens van zijn gehoor nog niet aangegeven. Mogelijk heeft de patiënt een der harmonische boventonen (bv. $4 n_0$) als laagste toon gehoord; mogelijk werd bij deze stemvork het optreden van den eersten niet-harmonischen boventoon ($\pm 6,25 n_0$) niet voldoende tegengegaan en is deze waargenomen.

De stemvork mag dus geen aanspraak maken op een groote mate van toonzuiverheid zooals bij de electriche toongeneratoren het geval is (hoofdstuk II). Voor de practijk van het gehooronderzoek vindt echter een reeks stemvorken tot op heden nog de meeste toepassing en men kan hiermee voldoende betrouwbare gegevens verkrijgen.

In dit proefschrift is een onderzoek ingesteld naar de boventonen bij de stemvork. De vroegere onderzoekers op dit gebied moeten bij hun proeven veel moeilijkheden hebben ondervonden daar ze hierbij steeds uitgingen van het samengestelde geluid.

Door toepassing van de stemvorkaandrijving met behulp van een triode-lamp is het bij dit onderzoek mogelijk gebleken elk der niet-harmonische boventonen afzonderlijk te doen optreden. Deze tonen zijn daardoor beter toegankelijk geworden voor het onderzoek. Ook is thans de trillingswijze van de stemvork bij elk dezer tonen nauw-

keurig na te gaan. Daarbij werd ook gelet op het optreden der harmonische boventonen. Het wezen van deze tonen en de ontstaanswijze zijn nog niet nauwkeurig bekend. Men neemt algemeen aan, dat harmonische boventonen ontstaan in de lucht naast de stemvorkbeenen. Daarentegen zijn in den laatsten tijd enkele onderzoekers van meening, dat deze tonen toch als eigen trillingen van de stemvork zijn te beschouwen.

In hoofdstuk I wordt een literatuuroverzicht gegeven betreffende de verschillende boventonen bij de stemvork.

In hoofdstuk II zijn eenige beschouwingen meegedeeld over het optreden van boventonen bij verschillende instrumenten die ten dienste staan van het gehooronderzoek.

Hoofdstuk III beschrijft de toepassing der triode als methode van onderzoek voor de boventonen bij de stemvork. De inrichting der registratie-apparatuur is hier ook vermeld. Voorts wordt een bepaalde registratie-methode aangegeven met behulp waarvan de trillingswijze van de stemvork bij elk der niet-harmonische boventonen objectief kan worden aangetoond.

Hoofdstuk IV omvat het eigenlijke onderzoek. Hierin worden de resultaten meegedeeld van toonhoogtebepalingen en registraties der afzonderlijke boventonen. Bij dit onderzoek is ook de invloed nagegaan van verschillende factoren op het optreden der boventonen bij de stemvork (steelaanhechting, loopgewichten en wijze waarop de stemvork in trilling wordt gebracht).

Hoofdstuk V geeft een korte samenvatting van de uitkomsten die het onderzoek heeft opgeleverd.

HOOFDSTUK I.

VROEGERE ONDERZOEKINGEN OVER BOVENTONEN BIJ STEMVORKEN.

§ 1. *Niet-Harmonische Boventonen.*

De eerste die waarnemingen deed omtrent het optreden van boventonen bij stemvorken en staven is C h l a d n i ¹⁾ geweest (1802). Hij stelde experimenteel het bestaan vast van de *niet-harmonische* boventonen, die den grondtoon begeleiden. C h l a d n i beschouwde de stemvork slechts als een transversaal trillende staaf, die is omgebogen. Bij een rechte staaf, die aan beide uiteinden vrij is, liggen de beide knooppunten voor de grondtoon op $\frac{1}{5}$ der staaflengte vanaf de uiteinden. Wordt de staaf in het midden gebogen, dan naderen deze knooppunten elkaar, om, wanneer de beenen evenwijdig zijn geworden, in de ombuigingsplaats te liggen, niet ver van elkaar verwijderd. Daarbij is de grondtoon gedaald tot $\frac{16}{25}$ van de oorspronkelijke toonhoogte. Wat nu de niet-harmonische boventonen aangaat, de eerste boventoon, die bij de rechte staaf 3 knoopen heeft, werd bij den omgebogen vorm niet gevonden. Daar had de eerste boventoon 4 knoopen en de volgende telkens een knoop meer. De toonhoogten van grondtoon en dien eersten boventoon verhielden zich als 4 : 25. Voor de daarop volgende boventonen kon C h l a d n i aantoonen, dat de verhouding was als van de getallen $(p - 1)^2$, die men verkrijgt als p het aantal knoopen weergeeft, dus, te beginnen met den eersten boventoon, als $3^2 : 4^2 : 5^2 : 6^2$, enz. In deze rij kan dus het

¹⁾ Die Akustik (1830) § 87—§ 89 (1e Ausg. 1802).

verhoudingsgetal voor den grondtoon worden voorgesteld door $4_{/25} \times 3^2 = 1^{11}_{/25}$ (zie het schema fig. 1).

Dit zijn de verhoudingen van grondtoon en boventonen die *Chladni* vond bij *omgebogen staven*. Zoo nam hij uitgaande van den grondtoon *c* hiernaast de volgende boventonen waar: gis^2 , fis^3 , d^4 , gis^5 en cis^5 .

*Helmholtz*¹⁾ onderzocht de tonen die door de *stenvork* worden voortgebracht. Hierbij is ter plaatse van de ombuiging een verbreeding („hart”) aangebracht, die een overgang vormt naar den steel. Hij verkreeg nu andere uitkomsten dan *Chladni*, daar hij naast den grondtoon alleen de boventonen kon aantonen, waarvoor het aantal knopen even is. De andere boventonen (waarvoor dit aantal oneven is) vond hij bij de stenvork niet, doch van dit feit gaf hij geen verklaring. De verhouding der toonhoogten die *Helmholtz* opgeeft is ook vrijwel dezelfde als welke *Chladni* vond voor de boventonen met 4, 6 en 8 knopen. *Helmholtz* nam nl. naast den grondtoon *c* de boventonen as^2 , d^4 en c^5 waar.

Helmholtz vermeldt verder dat deze niet-harmonische boventonen gemakkelijk zijn te onderscheiden van den grondtoon die veel lager is. Hij beschrijft voorts den invloed van plaats en wijze van aanslag op de sterkte van deze boventonen. De boventonen waarvoor op de plaats van aanslag een bewegingsmaximum (buik) aanwezig is treden het krachtigst op. Er treden meer en hogere boventonen op met hard dan met elastisch aanslagmateriaal. Groote elasticiteit van het stenvorkbeen bevordert het voortbestaan der afzonderlijke trillingsbewegingen van hooge boventonen naast den grondtoon.

*Quix*²⁾ werkte met een omgebogen staaf. In de plaats van ombuiging was deze over een horizontaal verloopende gummislang opgehangen, opdat het aantal bewegings-

¹⁾ Die Lehre v. d. Tonempfindungen (1865), p. 121.

²⁾ Zeitschr. f. Ohrenheilk. Bd. 52 (1906), p. 294.

vormen zoo groot mogelijk zou kunnen zijn. Bij krachtigen aanslag aan het vrije uiteinde van een der beenen werden nu behalve de grondtoon veel boventonen gehoord. Door auscultatie langs de stemvorkbeenen konden voor verscheidene dezer tonen de knoopplaatsen worden vastgesteld. Daarna fixeerde Q u i x de staaf eenigszins in de

AANTAL KNOOPEN	GRONDTOON	BOVENTONEN					
	2	3	4	5	6	7	8
VERHOUDING DER	1		$6\frac{1}{4}$	$11\frac{1}{4}$	$17\frac{15}{56}$	25	$54\frac{1}{16}$
TOONHOOGTEN(CHLADNI)	$1\frac{11}{25}$		5^2	4^2	5^2	6^2	7^2
KNOOPPLAATSEN EN TRILLINGSWIJZE							
AANWEZIG BIJ OMGEBOGEN STAAF (CHLADNI)	●		●	●	●	●	●
AANWEZIG BIJ STEMVORK (HELMHOLTZ)	●		●		●		●

● = AANWEZIG
 ■ = NIET GEVONDEN

Fig. 1. Schema voor de niet harmonische boventonen bij omgebogen staaf en stemvork.

knoopen van één dezer boventonen en door aanslag tus-
schen twee dezer plaatsen wist hij dezen toon nu duidelijker
te voorschijn te brengen. Hij vond nu dezelfde boventonen
als Ch l a d n i en dezelfde verhouding van de toonhoogten
tot den grondtoon. Zoo werden naast den grondtoon c de
boventonen gis^2 , fis^3 , d^4 en g^4 waargenomen.

Daar bij mijn onderzoek de verhoudingen der boven-
tonen en de ligging der knoopen ook onder verschillende
omstandigheden zijn nagegaan, heb ik de uitkomsten van

Chladni en Helmholtz in een schema weergegeven.

Een boventoon met 3 knopen is dus door geen dezer onderzoekers gevonden. In dit schema is verder aangegeven de trillingsrichting aan de beenuiteinden en tusschen de knooppunten, zooals die op éézelfde oogenblik aanwezig is. Deze richting wordt bepaald door de ligging van deze punten. Men ziet uit het schema dat, ten aanzien van deze trillingswijze de niet-harmonische boventonen in twee groepen te verdeelen zijn, nl.:

een groep A: de boventonen, waarvoor het aantal knopen *even* is; hierbij bewegen zich de symmetrische punten der beenen (bv. de uiteinden) steeds t.o.v. elkaar in tegengestelde richting.

een groep B: de boventonen, waarvoor het aantal knopen *oneven* is; hierbij bewegen zich de beenuiteinden en andere symmetrische punten steeds t.o.v. elkaar in dezelfde richting.

Zoo behoort de z.g. „eerste” boventoon (4 knopen) tot groep A; ook bij den grondtoon vindt de beweging op deze wijze plaats. Tot groep B behooren de boventonen, waarvoor mediaan in de ombuigingsplaats een knoop wordt gevormd.

Auerbach¹⁾ geeft aan, dat er ook bij de *stembork* soms wel boventonen met een oneven aantal knopen op kunnen treden, nl. die met 5, 7 en 9 knopen (zie tabel 1).

	Grond- toon	Boventonen						
Aantal Knoopen . .	2	3	4	5	6	7	8	9
Toonhoogten (relat.)	n_0		$6,2n_0$	$12,2n_0$	$18,3n_0$	$23,5n_0$	$35n_0$	$58n_0$

 = niet gevonden.

Tabel 1. Verhoudingen der niet-harmonische boventonen bij de stembork vlg. Auerbach.

¹⁾ Winkelmann's Handb. d. Physik, Bd. II, Akustik, p. 355.

In verband met den trillingsvorm noemt hij deze tonen de „asymmetrische boventonen”. Deze naam kan tot verwarring aanleiding geven, daar Lindig hiermee de harmonische boventonen betitelt, wat een geheel ander begrip is. Ook Auerbach heeft geen boventoon met 3 knoopen gevonden, deze trilling zou niet kunnen optreden, omdat daarbij het zwaartepunt van de stemvork te veel verplaatst zou worden.

§ 2. *De Harmonische Boventonen.*

Over het optreden van harmonische boventonen vinden we bij Chladni nog niets vermeld. De eerste, die deze tonen waarnam is Roeber¹⁾ geweest in 1830. Hij vond bij stemvorken nl. het octaaf, wat hij duidelijk onderscheidde van de luider klinkende, niet-harmonische boventonen. Over de ontstaanswijze kon hij geen mededeeling doen.

Daarna deed Seebeck²⁾ waarnemingen bij klokken en stemvorken, waaruit ons blijkt, dat hij daarbij harmonische boventonen heeft gehoord.

De eerste, die het optreden van deze tonen trachtte te verklaren is Helmholtz geweest. Aanvankelijk³⁾ dacht hij, dat zijn resonantie-stemvorken die hij in de acoustiek invoerde, vrij zuivere tonen gaven. In de eerste drie uitgaven van zijn vermaarde „Lehre von den Tonempfindungen” spreekt Helmholtz alleen over niet-harmonische boventonen, zonder daarbij het octaaf, enz. te noemen. Later⁴⁾ kon hij bij een stemvork met 64 trillingen per sec., met behulp van zijn resonatoren, de harmonische boventonen („Theiltöne”) tot en met de 5^e

¹⁾ DOVE, Repert. der Physik, Bd. 3 (1830), p. 55.

²⁾ DOVE, Repert. der Physik, Bd. 8 (1849), p. 69.

³⁾ Die Lehre v. d. Tonempfindungen, Ausg. 4, (1877), p. 94—95.

⁴⁾ Die Lehre v. d. Tonempfindungen, Ausg. 5, (1896), p. 263 en Poggend. Ann. d. Physik u. Ch. Bd. 99 (1856), p. 506.

aantoonen, maar alleen als hij de aanslag zoo sterk maakte dat de amplitude ongeveer 1 cm bedroeg. Zijn de uitwijkingen van de stemvorkbeenen zoo groot, dan ontstaan er in de lucht in de omgeving sterke stroomingen, waarvoor de regels voor enkelvoudige trillingen niet meer zouden gelden. De trillingen van deze elastische lichamen zouden nu de grenzen overschreden hebben, „binnen welke de elastische krachten evenredig zijn aan de uitwijkingen”. En dat daardoor harmonische boventonen moeten ontstaan meent *Helmholtz* op dezelfde wijze te kunnen aantoonen als hij dat doet voor 't verklaren van zijn combinatietonen.

Helmholtz legt dus steeds den nadruk op de groote intensiteit van den grondtoon als voorwaarde voor het ontstaan der harmonische boventonen. Later vonden *Lindig* e. a. dat deze tonen ook in het zwakste stemvorkgeluid steeds aanwezig zijn.

De volgende onderzoeker bij het vraagstuk der harmonische boventonen is *Quincke* geweest. In 1866 vond hij ¹⁾ bij zijn proeven met interferentiebuizen het octaaf bij alle stemvorken en orgelpijpen die hij daarop onderzocht. Over hoogere tonen en over disharmonische boventonen spreekt hij niet. Het beginsel van de methode, die hij invoerde bij het beluisteren der boventonen, is later opnieuw toegepast en is van waarde voor dit vraagstuk. Het buisje waarmee hij zijn geluidsbronnen, nl. stemvorken, orgelpijpen en snaren ausculteerde vertakte zich in tweeën. Deze afzonderlijke vertakkingen hadden een lengteverschil van de halve golflengte van den grondtoon. Daarna liepen ze weer ineen tot het uiteinde wat men in den gehoorgang bracht. De grondtoon werd nu niet meer waargenomen, daar luchtverdunning en -verdichting elkaar opheffen. Hij kon zoo bij zijn geluidsbronnen steeds het octaaf goed waarnemen, daar dit nu niet door den grond-

¹⁾ Pogg. Ann. d. Physik u. Ch., Bd. 128 (1866), p. 177.

toon werd overstemd (dit laatste is het geval, wanneer men een der buisjes dicht knijpt). Vooral bij een piano-snaar, waar de boventonen zooveel tot den klank bijdragen, zijn deze bij interferentie van den grondtoon goed te hooren. Verder vermeldt *Quincke* dat hij in de curve door een stemvork opgeschreven vaak het octaaf heeft herkend. Hierin moet hij zich vergist hebben. Een afbeelding van zoo'n curve heeft hij aan zijn publicatie niet toegevoegd. We zullen later zien dat de stemvorkbeenen zelf het octaaf niet bevatten, evenmin als de knoop van het octaaf, welke zich volgens *Quincke* in 't midden van het stemvorkbeen zou bevinden. Uit den aard der zaak dooft dergelijk interferentie-apparaat niet alleen den toon uit, waarvan de halve golflengte gelijk is aan het lengteverschil der buisjes, maar alle tonen waarvoor dit verschil een oneven veelvoud van hun halve golflengte uitmaakt. Is de grondtoon n_0 , dan worden dus ook de 2^e en 4^e harmonische boventoon, nl. $3n_0$, $5n_0$, enz. uitgedoofd. Hieraan is het dan ook toe te schrijven dat *Quincke* alleen het octaaf als de sterkste van deze harmonische reeks heeft waargenomen.

Ook het werk van *Kießling*¹⁾ moet in dit verband genoemd worden, daar hij bij de stemvork het ontstaan verklaarde van interferentievlakken, waarin de grondtoon werd uitgedoofd, zoodat de harmonische boventonen nu beter konden worden waargenomen. Bij een transversaal trillende staaf gaat het vlak van geluidsinterferentie door de as van de staaf en bevindt zich loodrecht op het trillingsvlak. In dit interferentievlak heffen de luchtverdichtingen en -verduunningen elkaar op. Bij de stemvork is er sprake van twee staven, die zich uiteen en naar elkaar toe bewegen. Het geval van de enkelvoudige staaf wordt nu gecompliceerd door:

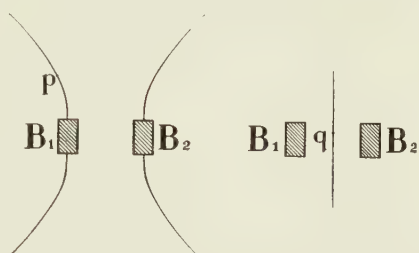
¹⁾ Pogg. Ann. der Physik u. Ch. Bd. 130 (1867), p. 177.

- ten eerste: de reflexie van de geluidsgolven tegen de binnenvlakte van de beenen,
 ten tweede: de invloed van de luchtbewegingen rondom het eene been op die om het andere.

Het resultaat is nu (fig. 2a) dat de interferentievlakken dicht bij de beenen nog vrijwel recht zijn en loodrecht op de trillingsrichting staan, waarna ze zich sterk naar buiten gaan krommen als cylindervlakken van hyperboloiden vorm. In fig. 2a zijn deze vlakken evenals de stemvorkbeenen B_1 en B_2 dwars getroffen.

Door de beenuiteinden van een electromagnetisch gedreven stemvork loodrecht te laten hangen in

water, waarop een weinig lycopodiumpoeder is gestrooid, is het verloop van deze interferentievlakken tusschen de intensieve wervelbewegingen duidelijk te zien.



a. Interferentievlakken van den grondtoon en de boventonen met even aantal knoopen.

b. Interferentievlak van de boventonen met oneven aantal knoopen.

Fig. 2.

Behalve voor den grondtoon zijn deze vlakken tevens de interferentieplaatsen voor die boventonen, waarvoor symmetrische gedeelten t. o. v. elkaar eveneens in tegengestelde richting bewegen (aantal knoopen even). Deze worden hier, b.v. bij p (fig 2a) dus niet gehoord. Bij deze boventonen wordt evenals bij den grondtoon het krachtigste geluid tusschen beide stemvorkbeenen waargenomen.

Bij de boventonen, waarbij de stemvorkbeenen steeds in dezelfde richting trillen (aantal knoopen oneven), wordt op deze plaats een luchtverdichting, afkomstig van de beweging van het eene been, steeds door een gelijktijdige verdunning door uitwijking van het andere been opgeheven, zoodat men bij q (fig. 2b) deze tonen niet zal waarnemen. Voor deze boventonen zouden dus de plaatsen van interferentie in het mediane vlak tusschen beide stemvorkbeenen gelegen moeten

zijn (Quix)¹⁾, zooals is voorgesteld in fig. 2*b*. Dit interferentievlak is gemakkelijk aan te toonen wanneer men de stemvork in een deze boventonen afzonderlijk laat trillen (hoofdst. IV).

De vroegere onderzoekers moeten bij hun proeven zeer veel moeilijkheden hebben ondervonden, daar ze bij auscultatie steeds meerdere boventonen tegelijk waarnamen. Met behulp van interferentie-apparaten werden in het geluid de hinderlijkste boventonen weggewerkt of men bracht, om een boventoon te versterken, den aanslag aan tusschen twee knoopplaatsen, die eenigszins waren gefixeerd.

Korten tijd nadat het ontstaan van de interferentieplaatsen door Kiessling afdoende was verklaard, paste Stefan²⁾ ze bij de studie van de harmonische boventonen toe. Hij nam op de plaatsen waar de grondtoon werd uitgedoofd (fig. 2*a*) het octaaf waar met behulp van auscultatie. Hij dacht toen dat dit alleen maar in die vlakken optrad. Over harmonische boventonen hooger dan het octaaf spreekt hij niet.

Wanneer men deze plaatsen ausculteert en de opening van het hoorbuisje is voldoende nauw, dan hoort men hier inderdaad verschillende boventonen duidelijk. Uit toonhoogtebepalingen, b.v. met behulp van een electrischen audiometer, blijkt dat het voornl. harmonische boventonen zijn. Van de plaats van de vlakken kan men zich vergewissen door eerst de figuren van het lycopodium op water na te teekenen en de teekening naast de stemvork te houden.

Dat stemvorken ook onder gewone omstandigheden, dus niet alleen bij lage tonen of groote amplitude, zeer veel harmonische boventonen doen ontstaan, deze kennis is voornamelijk te danken aan een onderzoek door

¹⁾ Zeitschr. f. Ohrenheilk., Bd. 47 (1904), p. 339.

²⁾ Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch, zu Wien, math. Kl., Bd. 61 (1870), p. 491.

Stumpff ¹⁾ verricht. Van nog meer belang echter is de objectieve methode, die hij aangaf ter identificatie van een groot aantal dezer boventonen, waardoor de inzichten die men toen over dit vraagstuk had, werden gewijzigd. Met König ²⁾ nam men toen algemeen aan, dat, als de toonhoogte van den harmonischen boventoon die men wenscht aan te toonen n bedraagt, en als de stemvork met behulp waarvan men zwevingen heeft verkregen, ongeveer dezelfde toonhoogte heeft, laten we zeggen $n \pm p$, dat dan deze toon $n \pm p$ ook zwevingen vormt met $^{n/2}$, met $^{n/3}$ enz., dus ook met den grondtoon van den te onderzoeken boventoon. Stumpff toonde aan dat dit onjuist is. Hij ging als volgt te werk. Als geluidsbron gebruikte hij een ongedekte orgelpijp met toonhoogte 50 v. d. Dit geluid, dat veel harmonische boventonen bevat, geleidde hij met een dikke gummibuis door een 60 cm. dikken wand naar een ander vertrek, echter met inschakeling van een interferentie-buis vgl. Quincke (als boven vermeld), zóódanig dat de 7^e harmonische boventoon (400 v. d.) werd uitgeschakeld (de beide buizen verschilden dus in lengte de halve golflengte van dezen toon). Een resonantie stemvork van 400 v. d. in dit vertrek opgesteld, gaf nu geen geluid, maar kwam onmiddellijk in trilling als de interferentiebus werd toegeknepen, dus als alle boventonen konden toetreden. De stemvorken met grondtonen 100, 150, 200, 250, 450 en 500 v. d. geraakten in beide gevallen in trilling. Het bleek dus, dat een grondtoon n alleen niet in staat is een resonantie-stemvork $8n$ in trilling te brengen. Overtuigender werd de proef toen Stumpff den grondtoon nog krachtiger maakte, door deze door een bazuinblazer te laten voortbrengen.

¹⁾ Wied. Ann. d. Physik u. Chemie. Bd. 57 (1896), p. 660.

²⁾ Pogg. Ann. d. Physik u. Chemie. Bd. 157 (1867), p. 177. Wied. Ann. d. Physik u. Chemie. Bd. 12 (1881), p. 335.

Daarna werd de resonantie-methode vervangen door die der zwevingen. Daartoe werden al de resonantiestemvorken 4—5 trillingen ontstemd. Het bleek, dat er zwevingen optreden alleen als in het toegevoerde geluid de boventoon aanwezig is, die met de stemvork in hoogte enkele trillingen verschilt en dat een zweving uitblijft, als die boventoon door interferentie wordt uitgeschakeld. Slechts de boventoon maakt de zweving mogelijk, niet de grondtoon. Deze methode bleek een beter hulpmiddel te zijn dan die der resonantie.

Verder deelt S t u m p f mee, dat hij bij de vrij trillende stemvorken de boventonen langer hoorde dan bij de resonantie stemvorken van A p p u n n en K ö n i g. De stemvorken werden zoo krachtig mogelijk aangeslagen. Het grootste aantal harmonische boventonen, dat hij zoo kon aantoonen is 12; dit was het geval bij een gewone stemvork C (64 v. d.). Bij een electromagnetisch gedreven stemvork (grondtoon 100 v. d.) hoorde hij nog de zweving met den 17^{den} harmonischen boventoon! De beenen waren hier dunner dan bij de andere stemvorken. De waarneming, reeds door K ö n i g ¹⁾ vermeld, dat de dikte der beenen hierbij van invloed is, kon S t u m p f bevestigen. Was deze dikte $13\frac{1}{2}$ bij 20 mm zooals bij een stemvork a₂ (880 v. d.), dan kon hij zelfs het octaaf niet aantoonen.

Wat andere geluidsbronnen aangaat, kon hij bij flesschen, die hij aanblies nog de 5^e harmonische boventoon aantoonen als de grondtoon 100 v. d. bedroeg; verder vermeldt hij deze tonen bij sirenen.

Voor gehooronderzoek geeft S t u m p f den raad een geringe geluidsterkte te gebruiken en boventonen door interferentie uit te sluiten.

Over het wezen van de harmonische boventonen vermeldt S t u m p f alleen, „dat ze in de lucht objectief aan-

¹⁾ Wied. Ann. d. Physik u. Chemie. Bd. 12 (1881), p. 337.

toonbaar zijn". Degene, die na Helmholtz het ontstaan nader heeft verklaard is Lindig ¹⁾ geweest (1903). Hij ausculteerde met behulp van twee nauwe buisjes van dezelfde lengte, die ineenloopen tot een gemeenschappelijk aanzetstuk, dat in den gehoorgang werd gebracht (zie fig 3a). Beluistert men nu tegelijkertijd twee plaatsen waar de grondtoon in tegengestelde phase op-

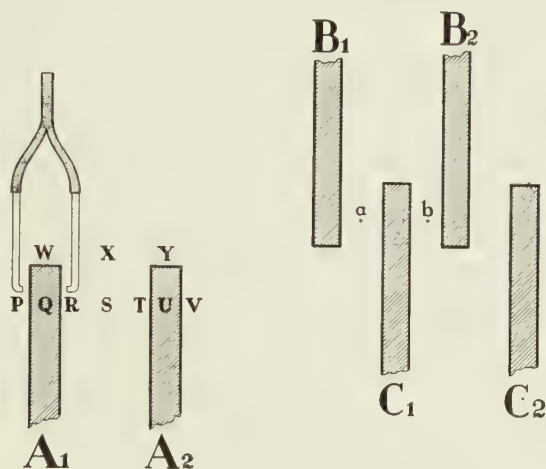


Fig. 3. De proeven van Lindig.

treedt, dan wordt de grondtoon uitgedoofd. Tengevolge daarvan nam Lindig nu zeer duidelijk het octaaf waar. Dit is dus het geval als de uiteinden van de beide buisjes gehouden worden op de plaatsen p en r , p en t , t en v , r en v en ook bij w en y . Het octaaf is dus in de lucht naast de stemvorkbeenen aanwezig. Om aan te toonen dat het octaaf evenzeer in de lucht tusschen de stemvorkbeenen optreedt stelde Lindig 2 stemvorken zoo op, dat de beenuiteinden t. o. v. elkaar zijn aangebracht als in fig. 3b is voorgesteld. Van beide stemvorken waren de toonhoogten ongeveer gelijk. Luistert men bij a , dan hoort

¹⁾ Ann. d. Physik. Bd. 11 (1903), p. 39.

men hier het octaaf optreden gedurende den tijd dat de phaseverhouding tusschen B_1 en C_1 den grondtoon doet uitdooven. Echter hoort men ook op de plaats b , dus tusschen twee binnenkanten der stemvorkbeenen, het octaaf gedurende het uitdooven van den grondtoon. Het resultaat van zijn proeven is, dat aangetoond kon worden, dat het octaaf aan alle kanten van het stemvorkbeen in de lucht aanwezig is en overal tegelijkertijd in dezelfde phase optreedt. Dit beteekent dus, dat het octaaf geen transversale trilling is, die door het stemvorkbeen zelf wordt uitgevoerd, want dan zou dit zich tegelijkertijd naar binnen en naar buiten moeten verplaatsen. Ook is het geen longitudinale trilling van het stemvorkbeen, daar de verhouding tot den grondtoon dan niet harmonisch zou zijn. De plaats, waar het octaaf ontstaat, is dus ook de lucht die het stemvorkbeen omgeeft.

L i n d i g verklaart het octaaf uit de beweging van de luchtdeeltjes naast het stemvorkbeen, die asymmetrisch plaats vindt. Voor deze beweging stelde hij een differentiaalvergelijking op, waaruit hij kon besluiten dat uit deze trilling het octaaf en de andere harmonische boventonen ontstaan. Hij heeft deze tonen daarom „*Asymmetrie-tonen*” genoemd.

De verklaring, die L i n d i g aangegeven heeft voor het wezen en het ontstaan der harmonische boventonen bij de stemvork en andere elastische lichamen, wordt algemeen aangenomen.

§ 3. *De invloed van de stemvorkbevestiging op het optreden der boventonen.*

Bij de stemvork houdt het optreden van sommige boventonen verband met de bewegingen die de steel uitvoert. In den stemvorksteel treden namelijk verschillende trillingen op.

I. Wanneer de steelas in het verlengde ligt van de as

van de vork, zullen de transversale bewegingen, die in de plaats van ombuiging aanwezig zijn, zich als longitudinale trillingen aan den steel meedeelen. Deze zijn dus afkomstig van de transversale stemvorktrillingen, waarvoor ter plaatse van de steelaanhechting een „buik” wordt gevormd, dus van den grondtoon en ook van de boventonen met even aantal knopen. Deze longitudinale uitslagen treden echter voornamelijk op als de steel wordt vastgehouden of b.v. tegen den schedel wordt aangesteund. S t r u y c k e n ¹⁾ demonstreerde hoe bij een stemvork, die in de plaats van ombuiging is opgehangen over een horizontaal verloopende gummislang, de transversale bewegingen van de beenen als zoodanig op den steel overgaan en daarin op dezelfde wijze optreden. Daarbij verkeerden de transversale trilling aan het steeluiteinde en die aan het uiteinde van één der beide stemvorkbeenen in dezelfde phase. Is echter de steel eenigszins gefixeerd, dan overwegen de longitudinale uitslagen die de steel in zijn geheel meemaakt door de stooten in lengterichting die ze opvangt. De steeltrillingen worden voor het onderzoek naar de beengeleiding toegepast. Men dient hierbij echter twee omstandigheden te bedenken:

a. dat de intensiteit dezer steelbewegingen zeer verschillend kan zijn: is de massa van den steel groot, dan zijn de meegedeelde bewegingen gering. Zijn de beenen van zware loopgewichten voorzien, dan treden deze bewegingen in den steel krachtiger op en gedurende langeren tijd. Zoo loopen bij de verschillende stemvorkmodellen de verhoudingen tusschen de amplituden aan steel- en beenuiteinde zeer uiteen.

b. dat deze longitudinale beweging bij sommige stemvorken niet in den grondtoon, maar in het *octaaf* optreedt

¹⁾ Ned. Tijdschr. v. Geneesk. (1905), 2e Helft, p. 60.

P. H a c q u e b o r d, *Diss.*

(Lord Rayleigh)¹⁾. Door Edelmann²⁾ is dit objectief in een registratiecurve aangetoond. Het octaaf treedt nl. in den steel op bij de stemvorken zonder loopgewichten en waarbij tevens het juk of aanzetstuk bij de steelaanhechting verbreed is (de vorm door König ingevoerd). De verklaring hiervoor vindt men bij Edelmann²⁾ aangegeven. De stemvorken van de reeks van Bezold-Edelmann zijn ook naar dezen vorm geconstrueerd, echter zijn hierbij zware loopgewichten aangebracht, waarvan het zwaartepunt buiten de assen van de stemvorkbeenen ligt: als longitudinale steeltrilling treedt nu niet het octaaf, maar de grondtoon op, zooals door Edelmann is verklaard en aangetoond.

II. Ook als de steel wordt vastgehouden zetten de trillingen van grondtoon en niet-harmonische boventonen zich wel hierop voort als transversale bewegingen, hoewel in mindere mate als bij de vrije opstelling. Ook voor deze boventonen vormen zich in den steel trillingsmaxima en -minima en een boventoon wordt nu het langst gehoord als de steelklemming alleen in een knooppunt voor dezen toon plaats vindt. Aan het steeluiteinde behoeft voor deze boventonen niet steeds een „buik” aanwezig te zijn, daar men te doen heeft met een overgang van de transversale bewegingen van beenen naar steel.

Bij den grondtoon en de boventonen, waarbij de plaats van steelaanhechting zich eveneens tusschen twee knoopen bevindt (zie fig. 1), wordt deze overgang wel eens voorgesteld door aan te nemen dat de steel bij vele stemvorken niet geheel symmetrisch is aangebracht. De richting van de stooten die de steel opvangt valt niet samen met de as van den steel, zoodat hierbij steeds transversale compo-

¹⁾ Phil. Mag. 5, Series III, p. 460.

²⁾ Zeitschr. f. Ohrenheilk., Bd. 51 (1905), p. 64.

Leitfaden d. Akustik f. Ohrenärzte (1911), p. 30.

nenten werkzaam zijn. *Quix*¹⁾ heeft een aantal dezer boventonen als transversale trilling in den stemvorksteel aangetoond. De knoopplaatsen stelde hij voor elken boventoon afzonderlijk vast door auscultatie langs stemvorkbeen en steel. Daarna fixeerde hij de stemvork eenigszins in de knoopen van een dezer boventonen en bracht den aanslag tusschen twee dezer plaatsen aan. In het geluid was deze boventoon nu beter waarneembaar.

Ook de boventonen, waarvoor in de plaats van steel-aanhechting een knoop wordt gevormd (zie fig. 1), zijn in de steeltrilling aanwezig.

De niet-harmonische boventonen worden dus in het geluid van de steeltrillingen gehoord. De bewegingen die de afzonderlijke punten ook ter plaatse van de steel-aanhechting uitvoeren, zijn door *Struycken*²⁾ onderzocht. De beweging is daar ellipsvormig en aan den steel overwegen de transversale bewegingen zeer sterk. Bij deze waarnemingen was echter de stemvork vrij opgehangen.

III. In stemvork en steel is nog een andere transversaaltrilling als boventoon mogelijk, zooals door *Quix*¹⁾ is aangetoond. Hij werkte met een omgebogen staaf waaraan in de plaats van ombuiging een vrij lange steel was bevestigd. Het geheel was in deze ombuiging opgehangen over een horizontaal verloopende gummislang en het vrije uiteinde van een der beenen werd aangeslagen. Naast den grondtoon waren nu de niet-harmonische boventonen in de trillingen van omgebogen staaf en steel aan te toonen als boven is meegedeeld. Behalve deze werden echter nog enkele andere boventonen gehoord; deze verdwenen zoodra de steel met de hand werd omvat. Het bleek, dat men hier ook met een transversale trilling

¹⁾ Zeitschr. f. Ohrenheilk., Bd. 52 (1906), p. 294.

²⁾ Ann. d. Physik, Bd. 23 (1907), p. 643.

had te doen, waarbij de verdeeling der knoopplaatsen was als bij een vrije staaf, die hier gevormd werd door den steel en een der beenen. Het doet er niet toe welk been men als verlengstuk van den steel beschouwt daar het bleek, dat aan symmetrische plaatsen de trilling steeds in dezelfde richting plaats vond. Q u i x noemde deze tonen „*staaf-tonen*”. Hij kon drie der boventonen onderscheiden, waarbij in de „staaf” 2, 3 en 4 knoopen werden gevormd (Fig. 4).



Fig. 4.
Staaf- of
steeltoon.

De verhoudingen van deze boventonen tot den grondtoon wijken eenigszins af van die der andere niet-harmonische boventonen die in fig. 1 zijn aangegeven. Is de steel geklemd in de knoopen van een dezer staaf-tonen dan blijft deze optreden. Het is duidelijk, dat het optreden van deze boventonen, ook wel *steeltonen* genoemd, wordt bepaald o.a door steellengte en plaats van steelklemming.

De resultaten van enkele der nieuwere onderzoekers op het gebied van de boventonen bij de stemvork zijn elders vermeld (o.a. van A n d e r s o n en S c h m i d t-
H a c k e n b e r g in hoofdst. II, M. W a l l e r in hoofdstuk III).

HOOFDSTUK II.

EENIGE OPMERKINGEN OVER HET OPTREDEN VAN BOVENTONEN BIJ VERSCHILLENDE INSTRUMENTEN IN GEBRUIK BIJ HET GEHOORONDERZOEK.

§ 1. *Inleiding.*

Om bij kwalitatief en kwantitatief gehooronderzoek betrouwbare uitkomsten te verkrijgen zou de geluidsbron aan de volgende voorwaarden moeten voldoen:

ten 1e, de toonhoogte moet binnen physiologische grenzen willekeurig zijn te regelen en eveneens de geluidsintensiteit.

ten 2e, de eenmaal geijkte toonhoogte en geluidsintensiteit zooals deze door den geluidsbron worden aangegeven moeten steeds constant zijn.

ten 3e, de tonen moeten zuiver zijn, d.w.z. zonder of anders met weinig en zwakke boventonen.

ten 4e, de apparaten moeten eenvoudig van bediening zijn en niet te kostbaar.

Een instrument dat aan al deze eischen voldoet is nog niet gevonden.

Hoe is het nu bij de meest gebruikte instrumenten voor gehooronderzoek met deze voorwaarden, in 't bijzonder met de derde voorwaarde gesteld?

Deze instrumenten zijn de *stemvorken*, het *fluitje* vlg. *Galton-Edelmann*, het *monochord* van *Struycken* en de *klankstaven*, terwijl in de latere jaren de *electrische toongeneratoren* in zwang zijn gekomen. Een reeks labiale of tongpijpen wordt voor het onderzoek zelden meer toegepast.

§ 2. *Stemvorken.*

Om eenigszins betrouwbare gegevens te verkrijgen wordt nog steeds het meeste gebruik gemaakt van een reeks stemvorken. Het gebied der toonhoogten strekt zich hierbij gewoonlijk uit van 16 tot 4096 v. d. Bij deze bovengrens (c^5) is bij alle modellen de geluidsintensiteit reeds te zwak en niet goed te beoordeelen, ook niet uit den korten uitklinktijd die daarbij meestal minder dan 20 sec. bedraagt (zie ook bldz. 13). Gedurende het gehooronderzoek is directe amplitudemeting mogelijk, niet alleen bij lage stemvorken doch ook nog met een practische meetmethode tot c^2 („microptische” stemvorken van Struycken). Echter beoordeelt men in de practijk de geluidsintensiteit veelal naar den hoortijd, d. i. die, gedurende welke de patiënt het geluid waarneemt. Dat daarbij aanslag en wijze van klemming constant zijn is gewenscht en deze voorwaarden zijn vereischt als men met behulp van het decrement de amplitude aan het einde van den hoortijd wil bepalen.

De toonhoogte is bij de stemvork zeer constant, vandaar ook de toepassing als ijkingsinstrument.

Hoe is het nu bij het gehooronderzoek met de boven-tonen gesteld en hoe groot is de waarde van de methoden die aangegeven zijn om deze tonen eenigermate te dempen?

Wanneer men de schema's beschouwt, die de trillingswijze der afzonderlijke boventonen bij de stemvork aangeven (fig. 1), dan blijkt dat aan het stemvorkbeen op $\frac{1}{5}$ tot $\frac{1}{7}$ der afstand vanaf het vrije uiteinde (de beenlengte gerekend tot aan de beginplaats van ombuiging) een aantal knopen dicht bijeen liggen, voornl. die van de eerste vier niet-harmonische boventonen. Ook als men de bewegingen van een lage stemvork waarneemt in het licht dat door een stroboscoopschijf wordt onderbroken, is dit fraai te zien. Nu gaf reeds *Helmholtz* aan, de stemvork op die plaats met een breeden hamer van zacht

materiaal aan te slaan om de vorming van deze knoopplaatsen en daarmee van die boventonen eenigszins tegen te gaan. Bij sommige modellen is daarmee, b.v. bij de plaatsing van den hamer van *Lucas*, ook rekening gehouden. Andere onderzoekers trachtten de bewegingen der afzonderlijke gedeelten tegen te gaan door reepen spiegelglas tegen de beenen aan te brengen (*Quix*)¹⁾ of met behulp van ringen van een of andere stof (*Appunn*)²⁾. Desniettenstaande werden de boventonen gehoord.

Later gaf de Amerikaansche onderzoeker *Herbert Anderson*³⁾ een andere methode aan om het optreden van den eersten boventoon, die bij lage stemvorken zoo hinderlijk is, te vermijden, door de stemvork met een zachten hamer aan te slaan in de knoop voor dezen boventoon, d. i. op ongeveer een vijfde vanaf het vrije uiteinde en daarbij tevens de stemvorkbeenen tusschen duim en wijsvinger zacht te klemmen ter plaatse van de buik voor dezen boventoon, die op ongeveer $\frac{3}{5}$ vanaf het vrije uiteinde is gelegen. Hoewel de toon nu wat minder krachtig is, wordt de grondtoon veel gezuiverd. Er trad echter een andere boventoon op, die nog nooit was waargenomen. Deze boventoon was zwak en de toonhoogte bedroeg ongeveer $3 \times$ die voor den grondtoon. Bij stemvorken met grondtoon > 256 v. d. werd deze toon niet meer waargenomen. Deze toon was aanzienlijk te versterken door aan te slaan een eindweegs boven het juk, tusschen dit en de plaats van klemming met de vingers. *Anderson* noemt deze boventoon de „stem-overtone” en spreekt het vermoeden uit dat bij dezen boventoon de uiteinden der beenen zich in dezelfde richting bewegen, dit werd echter

¹⁾ Zeitschr. f. Ohrenheilk., Bd. 47 (1904), p. 332.

²⁾ Akust. Inst. in Hanau, 1889, p. 15.

³⁾ Physical Review, Vol. 21, Series II (1923), p. 692.

door hem niet met een objectieve methode aangetoond. We zullen later zien (Hoofdst. IV) dat het mogelijk is deze boventoon ook op andere wijze aan te toonen en dat de beweging op symmetrische plaatsen inderdaad in dezelfde richting plaats vindt.

Zeër verbreid is de methode bij de stemvorken de niet-harmonische boventonen te dempen met behulp van loopgewichten. Bij de meeste modellen voor het gehoor-onderzoek in gebruik, zijn deze aangebracht wanneer de grondtoon lager is dan 512 v. d. Bij de stemvorkenreeks van *Bezold-Edelmann* uit het bestek van *Edelmann* dempen de groote asymmetrisch aangebrachte loopgewichten de niet-harmonische boventonen met het oog op het gehooronderzoek voldoende af. Bij de kleinere bestekken als die bij vele oorartsen in gebruik zijn, zijn deze gewichten meestal te licht en hoort men ook reeds zonder resonator of ander hulpmiddel naast den grondtoon twee, drie of meer boventonen. Voorts ontbreken bij deze modellen de loopgewichten als regel reeds vanaf 192 v. d., zoo treft men b.v. een dergelijke stemvork aan waarbij naast den grondtoon c^2 (256 v. d.) steeds de tweede niet-harmonische boventoon (4470 v. d.) zeer krachtig wordt gehoord. Met het oog op de groote gevoeligheid van het oor voor een toon in het gebied c^2 — c^5 (*Zwaaarde-maker, Stumpf*) zijn dergelijke middelen voor het onderzoek niet bruikbaar.

Hoe is het nu met de andere boventonen, nl. de harmonische gesteld? Wordt het optreden van deze tonen ook door de loopgewichten verhinderd? Dit is eigenlijk niet te verwachten, wanneer men met *Lindig* aanneemt, dat deze tonen in de omgevende lucht ontstaan door de asymmetrische verhoudingen bij de beweging. Toch was men met *Bezold* en *Edelmann* algemeen van meening dat de bekende reeks door hen ingevoerd vrij zou zijn van deze boventonen.

Het is daarom van belang deze stemvorken op die tonen te onderzoeken. S c h m i d t-H a c k e n b e r g ¹⁾ heeft van de harmonische boventonen het octaaf bij deze stemvorken met zekerheid kunnen aantonen. Bij het geluid van een Edelmann'sche loopgewichtstembvork afkomstig, werd de grondtoon met behulp van interferentie-buizen van Quincke uitgedoofd: het octaaf werd nu gehoord en men kon hiermee stemvorken aan het trillen brengen die volkomen met dit octaaf overeenstemmen; dit gelukte niet als deze overeenstemming niet volkomen was. Wel was het octaaf bij een vrije stemvork van Edelmann langer aan te toonen dan bij hetzelfde instrument dat van de zware asymmetrische loopgewichten is voorzien; zoo hoorde S c h a e f e r ¹⁾ bij de stemvork g² van Edelmann den grondtoon en het octaaf in het eerste geval gedurende 120 en 30 sec. en in het tweede geval gedurende 20 en 5 sec. De aanslag werd bij deze proeven zooveel mogelijk constant gehouden. De loopgewichten hadden bij deze proef zelfs de verhouding der hoortijden bij grondtoon en harmonischen boventoon niet gewijzigd.

§ 3. *Fluitje vlg. Galton-Edelmann.*

Dit behoort tot de labiale orgelpijpen gerekend te worden. Bij deze pijpen heeft men wat het geluid aangaat voornamelijk met 2 factoren te maken: de liprand die door trilling verschillende tonen kan voortbrengen en de resonantieruimte, de pijp. De andere factoren, zooals afstand tusschen kern en bovenlip, plaatsing van liprand ten opzichte van resonantieruimte, enz. blijven hier buiten beschouwing. De luchtkolom in deze pijp geeft, wanneer ze in staande trilling is gebracht, als laagste toon den grondtoon aan; echter zijn daarnaast verschillende boventonen mogelijk. Zooals bekend is, kunnen bij de open pijpen alle

¹⁾ Passow-Schaefer's Beitr. Bd. 13 (1920), p. 50.

harmonische boventonen optreden en is bij de gedekte pijpen het aantal boventonen minder, daar zich hierbij aan het uiteinde steeds een knoop vormt. Bij de gedekte pijpen verhouden de frequenties dezer tonen zich daarom als de cijfers 1, 3, 5 enz., en wordt de toonhoogte (N) voor den grondtoon aangegeven door de verhouding

$$N = \frac{V}{4L},$$

waarbij V de voortplantingssnelheid van het geluid in de lucht aangeeft en L de lengte van de luchtkolom die in trilling verkeert. Hierdoor wordt ook de toonhoogte bepaald van den voornaamsten toon die het Galton-fluitje voortbrengt.

Wat nu de toonzuiverheid aangaat, gedragen de *grootte* labiale pijpen (met den grondtoon lager dan 300 v. d.) zich anders dan de *kleinere*, waartoe ook het Galton-fluitje gerekend moet worden.

Bij de *grootte orgelpijpen* is de resonantie zoo krachtig dat er eigenlijk geen sprake is van het afzonderlijk optreden van een labiaaltoon, welke ontstaan zou door trilling van den liprand nog vóórdat deze de lucht in de pijp tot resoneeren heeft gebracht. Veeleer is hier door de krachtige resonantie de luchtbeweging in de pijp van invloed op den labiaaltoon. Vandaar dat bij deze pijpen vrijwel onmiddellijk bij het aanblazen de grondtoon wordt aangegeven. Deze blijft dan zeer constant en vooral bij de gedekte orgelpijpen betrekkelijk zuiver, daar hier bij krachtiger aanblazen als eerste boventoon pas het duodecime optreedt en niet het octaaf.

Daarnaast bezitten deze grootte, gedekte pijpen voor tonen lager dan 200 v. d. nog het voordeel dat de intensiteit sterker is dan bij de stemvorken met gelijke toonhoogte, hoe krachtig deze ook worden aangeslagen. Bij een onderzoek door W. Kalähne ¹⁾ ingesteld naar de benedengrens voor het

¹⁾ Passow-Schaefer's Beitr. Bd. 5 (1912), p. 237.

gehoor werden met deze pijpen steeds lagere grenswaarden verkregen dan bij het gebruik van stemvorken. Het verschil bedroeg hierbij meestal een quart of een quint, soms een octaaf. De stemvorken werden bij deze proeven na krachtigen aanslag dicht bij het oor gehouden, de afstand tot de orgelpijpen bedroeg 1 meter. Waarneming van bodemtrilling of van lucht-beweging werd verhinderd. Dat de geluidswaarneming aan een boventoon was toe te schrijven was eveneens uitgesloten, daar geen geluidsversterking werd gehoord met de resonatoren van Schaefer wanneer deze op de bijbehorende boventonen waren afgestemd.

Men treft deze groote gedekte orgelpijpen nog in sommige klinieken aan, waar ze wegens hun voordeelen van toonzuiverheid en krachtige geluidsintensiteit nog wel eens toepassing vinden voor het onderzoek van het gehoor op lage tonen tot 200 à 300 v. d.

Geheel anders is het, wat de toonzuiverheid betreft, gesteld met de *kleinere labiaalpijpen*, als het Galton-fluitje. Blaast men een dergelijke kleine pijp voorzichtig met een geringen druk aan, dan hoort men slechts een lagen toon, die alleen voortgebracht wordt door trilling van den scherpen liprand. Dit geluid is nog vrij zwak, daar deze toon nog te laag is om de luchtkolom in de pijp mee te doen resoneeren. Blaast men het instrument nu krachtiger aan, dan gebeurt achtereenvolgens het volgende. De labiaaltoon stijgt iets, nl. bijna tot het lagere octaaf van den grondtoon van de pijp. Daarna springt de toon plotseling de hoogte in, zoodat ze het hogere octaaf van den grondtoon aangeeft; het gevolg is, dat de luchtkolom nu eenigszins mee resoneert, de resonantie is echter nog niet krachtig genoeg om dezen toon „vast te houden”, met het gevolg dat de toon weer daalt tot het lagere octaaf van den grondtoon. Hierna wordt de labiale toon bij krachtiger luchttoevoer langzaam hooger, tot de toonhoogte voor den grondtoon is bereikt, waarbij de pijp zeer krachtig gaat resoneeren. Pas als deze druk is bereikt geeft de pijp zeer

zuiver en krachtig den grondtoon aan. Gaat men bij het aanblazen nu den druk nog sterk vergrooten, dan treden de boventonen op, als boven reeds is aangegeven. Deze eigenaardige omstandigheden betreffende de toonhoogte zijn in de latere jaren nog eens bij een groot aantal kleinere en grootere labiaalpijpen onderzocht door L u t z ¹⁾.

Waar nu het fluitje van Galton met een kleinen gummi-ballon wordt aangeblazen, verkrijgt men bij het knijpen in den ballon niet van den beginne af aan den vereischten constanten druk en hoort men aanvankelijk een veel lageren labiaaltoon, H e g e n e r vond, dat deze optreedt als de druk nog slechts 5—6 cm water bedraagt en dat de hoogte voor dezen toon bij elke lengte van het fluitje ongeveer 11.000 v. d. bedraagt. De hoogere zuivere toon verkreeg men alleen bij een constanten druk van minstens 20 cm water. Met den labiaaltoon („Schneiden-ton" in de Duitsche publicatie's) had men in vele gevallen de bovenste gehoorgrens bepaald! Uit de lengtebepaling van het fluitje concludeerde men daarbij tot toonhoogten die in werkelijkheid ver boven de grens der waarneming liggen, als 50.000 v. d., wat door E d e l m a n n werd aangegeven. Ook liepen deze waarden veel uiteen. Voor het onderzoek betreffende de hooge tonen was men toen voornamelijk op dit fluitje aangewezen, daar de toepassing van de longitudinale trillingen eener snaar nog niet als methode van onderzoek was ingevoerd. Het was vooral S c h u l z e die met behulp van de methode van K u n d t nauwkeurige toonhoogtebepalingen deed bij het fluitje van Galton. Het verband tusschen toonhoogte en luchtdruk, zooals dat bij het Galtonfluitje bestaat en daarmee de mindere betrouwbaarheid voor het gehooronderzoek is aangetoond door M y e r s ²⁾, S c h u l z e ³⁾ en

¹⁾ Passow-Schaefer's Beitr. Bd. 17 (1921), p. 1.

²⁾ Journal of Physiology, 28 (1902), p. 417.

³⁾ Passow-Schaefer's Beitr. Bd. 1 (1908), p. 134.

H e g e n e r ¹⁾). Ook later is de toonzuiverheid van het instrument nog dikwijls het onderwerp geweest van acoustische en klinische onderzoekingen (S c h a e f e r ²⁾, D ö d e r l e i n ³⁾).

Om bij het fluitje van Galton bij het aanblazen den druk toch eenigszins constant te houden, bracht E d e l m a n n ⁴⁾ een nauwe metalen buis aan tusschen fluitje en ballon. De lage labiale toonen werden hierdoor zeker niet vermeden, daar de druk nu nog minder krachtig was geworden (H e g e n e r ⁵⁾). Om een constanten druk van minstens 20 cm water te verschaffen, zou men dus tevens over een afzonderlijk instrumentarium met manometer moeten beschikken (modificatie v. Schaefer). Dit is in de kliniek geen groot bezwaar, wel is het dit in de practijk van den oorarts.

Dat voorts een onderzoek naar de beengeleiding niet mogelijk is, is een nadeel dat bij dit fluitje en bij de orgelpijpen steeds blijft bestaan.

§ 4. *Monochord in longitudinale trilling.*

Toen het monochord voor de bepaling van de bovenste gehoor grens door S c h u l z e ⁶⁾ was ingevoerd en de uitkomsten bij het onderzoek betrouwbaar bleken te zijn (H e g e n e r ⁷⁾), heeft het instrument algemeene toepassing gevonden, vooral nadat het door S t r u y c k e n ⁸⁾ voor de practijk geschikt is gemaakt. Bij verschillende snaar lengten heeft S t r u y c k e n de trillingen photo-

¹⁾ Passow-Schaefer's Beitr. Bd. 1 (1908), p. 321.

²⁾ Passow-Schaefer's Beitr. Bd. 11 (1918), p. 197; id. Bd. 12 (1919), p. 255; id. Bd. 16 (1921), p. 1.

³⁾ id., Bd. 17 (1921), p. 81.

⁴⁾ id., Bd. 3 (1910), p. 261.

⁵⁾ id., Bd. 3 (1910), p. 413.

⁶⁾ id., Bd. 1 (1908), p. 134.

⁷⁾ id., Bd. 1 (1908), p. 321.

⁸⁾ id., Bd. 3 (1910), p. 406.

grafisch geregistreerd en daarbij de toonhoogte bepaald.

In 't algemeen geldt voor een snaar, die in longitudinale trilling verkeert, de verhouding

$$N = \frac{V}{2L}.$$

Hierbij geeft N de toonhoogte, V de voortplantings-snelheid van het geluid in de snaar en L de snaarlengte aan. Deze voortplantingssnelheid is evenredig met den wortel uit den elasticiteitsmodulus en omgekeerd evenredig met den wortel uit de dichtheid. Gebruikt men steeds dezelfde soort snaren, dus met bepaalden elasticiteitsmodulus en houdt men de spanning binnen bepaalde grenzen, dan is het product NL voor de longitudinale monochordtrilling een constante. De snaar is met een vleugelschroef zoodanig te spannen dat de spanning 25 kg. bedraagt; contrôle is mogelijk door een spanningsmeter aan de snaar op te hangen. De bedoelde constante bedraagt dan 251.000.

De hooge tonen van het monochord zouden, voorzoover ze in het hoorbare gebied liggen, voor het onderzoek voldoende zuiver zijn. Men kan betrouwbare grensmetingen doen wanneer de geluidsintensiteit niet te sterk is zooals dat bij het aanwrijven met kolophoniumpoeder wel het geval is. Bij fotografische registratie van de longitudinale trillingen vertoonde de curve dan onregelmatigheden, die aan boventonen waren toe te schrijven. Hieraan is te ontkomen door de snaar aan te wrijven met een stukje vilt in benzol gedrenkt. Ook hoort men dan minder wrijfgeruischen.

Steeds treedt bij dit in de lengterichting aanwrijven van het monochord ook een transversale trilling op, die met den longitudinaaltoon in frequentie weinig verschilt (de frequentie-verhoudingen tusschen deze beide zijn andere dan bij de klankstaven). Vandaar dat voor dezen toon de snaar in een groot aantal knopen is verdeeld, die te vinden zijn door kleine papierruitertjes op het monochord

te plaatsen (S c h u l z e ¹⁾) en daarna de snaar in lengterichting aan te wrijven. Deze tonen zouden echter bij het onderzoek van geen beteekenis zijn, daar ze boven de gehoorgrens zijn gelegen.

§ 5. *Monochord in transversale trilling.*

Men kan het monochord ook in transversale trilling brengen, b.v. door de snaar met een strijkstok aan te strijken of met een hamertje aan te slaan. Deze tonen hebben bij het gehooronderzoek niet zooveel toepassing gevonden als de longitudinale trillingen van hooge frequentie.

Bij deze transversale beweging wordt de toonhoogte ten naaste bij bepaald door de verhouding

$$N = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{Tg}{p}},$$

waarvoor N het trillingsgetal, L de lengte van de snaar, T de snaarspanning, g de versnelling der zwaartekracht en p het gewicht van 1 cm snaarlengte aangeeft. Wanneer de spanning bij eenzelfde snaar onveranderd blijft zou dus ook het product $N \cdot L$ steeds een constante zijn. S c h a e f e r ²⁾ heeft aangetoond, dat wanneer bij het monochord van Struycken de snaarspanning 14 kg bedraagt, bij snaarlengten vanaf 10 cm dit product constant blijft en 15225 bedraagt. Het monochord geeft dan in transversale trilling gebracht bij 35 cm de toon a^1 (435 v. d.). Voor de verschillende lengten der snaar heeft men de toonhoogte dezer trillingen aan het instrument aangegeven van 400 v. d. voor 38 cm tot 2048 v. d. voor 7.4 cm.

Hoe is het nu bij deze trillingen met de toonzuiverheid gesteld? Bij de snaar kunnen naast den grondtoon steeds

¹⁾ Passow-Schaefer's Beitr. Bd. 9 (1917), p. 54.

²⁾ id., Bd. 4 (1911), p. 376.

alle harmonische boventonen optreden, voor welke op de plaats van aanslag geen knoop wordt gevormd. Vele factoren zijn van invloed op aantal en intensiteit der boventonen, zooals de plaats waar de snaar in trilling wordt gebracht en de wijze waarop dit geschiedt (aanstrijken, hameraanslag of tokkelen), de eigenschappen van de „kam” en de massa en elasticiteit van den hamer. In de physische handboeken ¹⁾ worden intensiteit en andere eigenschappen der harmonische boventonen bij elk dezer systemen uitvoerig aangegeven. Vooral als bij een lengte van meer dan 15—20 cm de snaar wordt aangestroken, dient men met de harmonische boventonen rekening te houden, daar vele hiervan nog in de gehoorzône liggen. Aanslag met den rand van een hamertje van kurk geeft hierbij den grondtoon zuiverder weer dan aanstrijken, wat men bij kleinere snaarlengte moet toepassen.

§ 6. *Klankstaven.*

Bij de tonen van het monochord en van het Galton-fluitje heeft men met onderhouden trillingen te doen; de intensiteit is hierbij niet te beoordeelen. De longitudinale monochord-trillingen laten zeer nauwkeurige bepalingen toe van de bovenste gehoorgrens voor lucht- en beengeleiding. In hoeverre echter bij zoo'n hoogen toon de waarneming met het oog op de geluidsintensiteit nog mogelijk is blijft hierbij een open vraag. In dit gebied is een quantitatief gehooronderzoek van waarde gebleken te zijn.

Zoo neemt men af en toe gevallen waar van gehoorzenuwbeschadiging, waarbij de bovengrens voor lucht- en beengeleiding niet is gedaald, terwijl alleen de sterk verkorte hoortijd voor een stemvork c^4 of c^5 een aanwijzing is voor de binnenoordooftheid. Ook is dit dikwijls het geval bij be-

¹⁾ Handb. der Physik, Bd. 8 (1927), p. 369 en 388.

schadiging door detonatie of bij de binnenoordoorfheid die in het verloop van een slepende middenoorontsteking op den duur vaak optreedt, terwijl men met het monochord normale waarden voor de bovengrens vindt. Dgl. gevallen zijn ook meegedeeld door Uffenorde ¹⁾ en H. Vogel ²⁾, terwijl Heermann ³⁾ in dit verband de diagnostische waarde van hooge stemvorken bepleit.

Men heeft daarom den laatsten tijd naar een geluidsbron gezocht, waarbij dit onderzoek mogelijk is en die tevens in de praktijk van den oorarts is door te voeren (de audiometer blijft hier buiten beschouwing). De stemvork is hiervoor minder goed bruikbaar, daar bij de hoogere stemvorken de uitklinktijd te kort duurt om de waarneming naar den hoortijd te beoordeelen. Zoo bedraagt reeds bij de meeste c^5 -stemvorken (4096 v. d.) de hoortijd minder dan 20 sec. (de duur van 20—30 sec. bij sommige exemplaren is als optimum te beschouwen). Daarom zijn door Schaefer en Wethlo ⁴⁾ *klankstaven* geconstrueerd welke in longitudinale trilling gebracht de hooge tonen gedurende langen tijd doen weerklinken. Zoo kan de hoortijd bij de c^5 -klankstaaf meer dan 40 sec bedragen en bij de c^6 -klankstaaf 25 sec.

Hoe is het nu bij deze instrumenten met de toonzuiverheid gesteld? Bij een staaf zijn 3 verschillende wijzen van trilling mogelijk: torsie-, transversale en longitudinale trilling. De longitudinaaltonen zijn in 't algemeen zeer hoog; de voortplantingssnelheid is ook hier evenredig met den wortel uit den elasticiteitsmodulus. Het is practisch niet mogelijk bij een staaf uitsluitend longitudinale trillingen op te wekken, steeds heeft men in mindere mate ook met de lagere transversaaltonen te doen. Zoo experi-

¹⁾ Dtsch. Med. Wochenschr., 48 Jg., (1922), p. 120.

²⁾ Passow-Schaefer's Beitr. Bd. 17, (1922).

³⁾ id., Bd. 27, (1929), p. 158.

⁴⁾ id., Bd. 28, (1931), p. 171; Die Stimme, Bd. 26, (1932), Heft 6; zie ook: Struycken, Passow-Sch. Beitr. Bd. 28, (1931), p. 334.

menteerde K ö n i g ¹⁾) met een stalen cylindrische staaf van 32 cm lengte en 2 cm doorsnede, welke hij in longitudinale trilling bracht door hameraanslag aan een uiteinde, terwijl hij de staaf in het midden tusschen twee vinger-toppen vasthield. De staaf gaf nu naast den longitudinaaltoon c^6 tevens een krachtigen transversaaltoon en wel de tweede welke bij deze wijze van klemming mogelijk is, dus met 3 knoopen. Dit was ongeveer de toon e^4 . Voor het voortbrengen van een zuiveren hoogen toon bleken deze staven dus onbruikbaar te zijn. Het zijn hier dus niet zoozeer de boventonen die den toon onzuiver maken, maar de lagere tonen.

Bij een staaf die in longitudinale trilling verkeert treden naast den grondtoon steeds ook harmonische boventonen op, echter zijn deze b.v. bij een c^6 -staaf zeer zwak en hoog en daardoor voor een deel boven de gehoorgrens gelegen.

Worden de klankstaven voor de hooge tonen echter, zooals door S c h a e f e r en W e t h l o is aangegeven niet uit messing maar uit hard-aluminium bereid, dan klinken ze, met een metalen staafje in de lengterichting aangeslagen zeer lang uit. De lagere transversaaltoon is daarbij zéér zwak en het gelukte deze door een klemming met leder ter plaatse van de knoopen voldoende te dempen.

Andere klankstaven, die in transversale trilling worden gebracht, als door K ö n i g zijn ingevoerd, vinden tegenwoordig geen toepassing meer.

§ 7. *Electrische toongeneratoren.*

Toonhoogte en geluidsintensiteit zijn wel het fijnst regelbaar bij een electrischen audiometer. Deze naam is afkomstig van S e a s h o r e, de geluidsbron was aanvankelijk een geheel andere dan bij de nieuwere audiomters.

¹⁾ Wied. Ann. der Physik u. Ch. Bd. 69, (1899), p. 721.

Seashore en Bunch¹⁾ werkten met een wisselstroomgenerator met een groot aantal weekijzeren nokken. Door de snelheid van dit nokkenrad te regelen kan men de opgewekte wisselstroomfrequentie naar believen instellen en derhalve via den geluidsweegever de toonhoogte. Aan de toonzuiverheid zijn hierbij geen hoge eischen te stellen.

Later wendde men wisselstroomen aan van lage frequentie, die met behulp van drie-electrodenlampen werden opgewekt en leidde deze direct naar een geluidsweegever (telefoon). (Griessmann²⁾; Schaefer en Gruschke³⁾). Deze schakeling gaf aanleiding tot het optreden van een nog te groot percentage boventonen. Daarom is men overgegaan tot toepassing van de interferentie-methode, waarbij door middel van twee afzonderlijke trillingsketens twee hoogfrequente trillingen, ver boven de waarnemingsgrens, worden opgewekt. Door superpositie ontstaat o.m. een combinatietrilling, waarvan de frequentie gelijk is aan het verschil van die der beide componenten. Door de andere trillingen uit te zeven houdt men één zuivere trilling over, die in het hoorbare gebied ligt (zie o.a. Groeneveld⁴⁾) voor den toongenerator van Philips; Schwarz en Tigler⁵⁾ voor het Oto-audion).

Bij den Philips-toongenerator en het Oto-audion is de toonhoogtewisseling continu-variabel, bij de Amerikaansche audiometers in octaven.

Bij al deze toongeneratoren bestaat de moeilijkheid dat het energie-verlies bij de overdracht van de electricische in de geluids-energie niet gemakkelijk is te bepalen.

¹⁾ Laryngoscope (1919), p. 435 en (1923), p. 295.

²⁾ Passow-Schaefer's Beitr. Bd. 16, (1921), p. 47.

³⁾ id., Bd. 16, (1921), p. 56.

⁴⁾ Physica, 8e Jaarg., (1928), p. 157.

⁵⁾ Passow-Schaefer's Beitr. Bd. 28 (1931), p. 77; zie voorts: Abderhalden's Handbuch, Abt. V, Teil 7. Heft 8, (1932), p. 995.

Men heeft hierbij de toonzuiverheid onderzocht, door uit den stroomkring met behulp van een bepaalde schakeling alleen deze combinatie-trilling weer te elimineeren (S c h w a r z e n T i g l e r). Nu hoorde men wel eenige zwakke boventonen, doch deze werden niet meer waargenomen als men de combinatietoon weer liet „toetreden”. De intensiteit benadert dus nergens die van den combinatietoon; dit bleek ook toen deze onderzoekers met behulp van het Oto-audion een hoorcurve samenstelden en daarin ook de waarneming van deze boventonen aangaven. In physiologischen zin zou het geluid vrij zijn van boventonen.

Bij de geluidsweeergevers van deze toestellen mag van een eigen resonantiegebied natuurlijk ook geen sprake zijn. Alleen electrodynamische luidsprekers zouden hiervan vrij zijn en de tonen zuiver weergeven.

HOOFDSTUK III.

EEN BIJZONDERE TOEPASSING VAN STEMVORK- AANDRIJVING DOOR MIDDEL VAN EEN TRIODE. BESCHRIJVING VAN DE PROEFOPSTELLING.

§ 1. *Inleiding.*

Om bij de stemvork een onderzoek naar de boventonen in te stellen kan men op verschillende wijzen te werk gaan.

Vooreerst kan hiervoor van de resonantie gebruik gemaakt worden. Men kan met behulp van resonatoren bepaalde boventonen afzonderlijk waarnemen. Zoo geven o. a. de cylindrische resonatoren van Schaefer de boventonen bij de stemvork afzonderlijk zeer goed weer. Ook kan de boventoon die men zoekt een andere stemvork in trilling brengen, die dezelfde toonhoogte heeft als deze boventoon.

Een andere methode berust op het beginsel der interferentie. Het geluid wordt geleid in een soort interferentie-buis van Quincke, die echter van vele zijstukken is voorzien, zoodat een groot aantal tonen wordt uitgeschakeld.

Voorts kan men zwevingen doen optreden met behulp van een andere stemvork, waarvan de toonhoogte een weinig afwijkt van die voor den boventoon welke men zoekt.

De zwevingen kan men tegenwoordig gemakkelijker met het geluid van een electrischen toongenerator (audiometer) doen optreden. Zoo kan men bij de stemvork in korten tijd frequentiebepalingen doen van een groot aantal boventonen.

Als meest objectieve methode maakt men bij de boven-

tonen ook wel gebruik van *registratie*. Zoo kan men de trillingswijze van een punt van een der stemvorkbeenen zoo nauwkeurig mogelijk registreeren en deze analyseeren met het oog op de boventonen. Daartoe registreert men fotografisch de bewegingen van het licht, dat gereflecteerd wordt door een spiegeltje, dat aan of tusschen de stemvorkbeenen is opgehangen (S t r u y c k e n ¹⁾). Eenvoudiger gaat men te werk door aan een der beenen een stukje aluminiumfolie te bevestigen (S t r u y c k e n ¹⁾). Dit bevat microscopisch kleine gaatjes die bij doorvallend licht als lichtpuntjes dienst doen. De bewegingen hiervan worden zeer sterk vergroot en eveneens gefotografeerd. Zoo zijn langs dezen weg de trillingen van telefoon-trilplaten geregistreerd door H u i z i n g ²⁾). Behalve de grondtoon zijn hierbij een aantal boventonen in de registratiecurve te onderscheiden. Het betreft hier gedwongen trillingen.

Bij de stemvork worden op deze wijze dus de bewegingen opgeteekend, die door het stemvorkbeen zelf worden uitgevoerd, dit zijn de trillingen van grondtoon en eenige niet-harmonische boventonen. Daar de harmonische boventonen in de omgevende lucht ontstaan, vindt men deze in de curve dus niet weergegeven. Bij het registreeren van stemvorktrillingen is ook deze methode door mij herhaaldelijk toegepast en het is gebleken dat het aantal niet-harmonische boventonen, dat men zoo registreert, veel geringer is dan dat men met de andere methoden vaststelt. Ook na een krachtigen aanslag leverde de analyse van de fotografische curve bij een lage stemvork (64 v. d.) niet meer dan de eerste, hoogstens ook nog de tweede niet-harmonische boventoon op. Dit komt doordat deze tonen in verhouding tot den grondtoon een zeer

¹⁾ Ann. d. Physik Bd. 23 (1907), p. 643.

²⁾ Arch. Néerl. de Phon. Exp. Tome 5 (1930), p. 129.

groote frequentie bezitten, terwijl de amplitude zeer klein is. Daarentegen waren met behulp van een electrischen toongenerator nog zwevingen met den zesden dezer boventonen aan te toonen.

Met het oog op een groot aantal boventonen levert dus een directe registratie van de gezamenlijke stemvorktrillingen onvoldoende resultaat op.

De trillingen zijn ook langs indirecten weg te registreeren met behulp van gevoelige vlammen, die men fotografeert. Bij de stemvork zijn fotografieën van manometrische vlammen door H a l l o c k ¹⁾ geanalyseerd met het oog op de boventonen.

Om de trilling van een bepaalden boventoon afzonderlijk te registreeren zou men b.v. als volgt te werk kunnen gaan: men zou een der boventonen, zooals die door een resonator of door een stelsel van interferentie-buizen is afgezonderd, kunnen registreeren door dit geluid te leiden naar een registratie-apparaat. Als zoodanig zouden gevoelige vlammen, die men fotografeert, dienst kunnen doen (zie o.a. B r o w n ²⁾, Z i c k e n d r a h t ³⁾) of roetende vlammen (zie o.a. W e t h l o ⁴⁾, M a r b e ⁵⁾)).

In de literatuur, die mij ten dienste stond, is een toepassing van dergelijke methoden voor de boventonen bij de stemvork niet vermeld.

§ 2. *Toepassing der triode.*

De voordeelen die de directe registratie van de bewegingen van de stemvorkbeenen heeft zouden meer worden gewaardeerd als de boventonen in de curve duidelijker aan den dag traden, of als het mogelijk zou

¹⁾ Science, Vol. 11 (1900), p. 664.

²⁾ Phil. Mag. Vol. 13 (1932), p. 161.

³⁾ Helvetica Physica Acta, Vol. 5 (1932), p. 317.

⁴⁾ Passow-Schaefer's Beitr. Bd. 20 (1924), p. 259.

⁵⁾ Ann. d. Physik, Bd. 30 (1909), p. 579.

zijn de trilling van één bepaalden boventoon direct te registreeren. Er werd nu naar een methode gezocht waarbij men elk der niet-harmonische boventonen bij de stemvork afzonderlijk kan doen optreden. Het is tenslotte gelukt een stemvork in elk dezer boventonen te laten trillen door gebruik te maken van een electrisch aandrijfsysteem met een drie-electrodenlamp, zooals ook toegepast kan worden tot het in trilling brengen van elastische lichamen van magnetisch materiaal.

Bij juiste instelling van een dergelijk aandrijfsysteem geeft de stemvork krachtig den grondtoon aan, *doch door verandering van de frequentie der wisselstroomen en daarmee van die der magnetische aantrekkingen der stemvorkbeenen is het mogelijk gebleken elken boventoon afzonderlijk te doen optreden.*

Deze tonen zijn hiermee voor het onderzoek beter toegankelijk geworden, ook wat de bewegingsvorm aangaat die het stemvorkbeen of de omgebogen staaf bij elk dezer boventonen aanneemt (de ligging der knooppunten en der buiken). Dit was bij de oudere methoden een bijkans onoverkomelijke moeilijkheid, waar de wijze van beweging bij den samengestelden toon een zeer ingewikkelde is. Daarbij behoudt bij de nieuwe methode elke boventoon dezelfde frequentie als bij de samengestelde beweging, alleen is bij deze min of meer enkelvoudige trilling de intensiteit van den boventoon bij juiste afstemming veel grooter zijn dan die bij de samengestelde trilling voor dien betreffenden toon meestal bedraagt. Dit komt vooral bij de hoogere tonen het vaststellen der knoopen, maar ook de registratie der bewegingen, ten goede.

Bij deze methode, die door Eccles en Jordan¹⁾ met een ander doel voor stemvorkaandrijving het eerst

¹⁾ Proc. Physical Soc., Vol. 31 (1919), p. 269.

toegepast werd, wordt dus gebruik gemaakt van een electrisch aandrijfsysteem met triode-schakeling. Het denkbeeld om deze methode toe te passen dank ik aan Dr. H. C. H u i z i n g, die mij ook bij de opstelling ter zijde stond. Met behulp van de triode is het mogelijk wisselstroomen van allerlei frequenties op te wekken. Deze wisselstroomen leidt men door spoelen met ijzeren kern; in den roosterkring neemt men de eene electro-magneet op en de andere plaatst men in den plaatkring. Zijn de spoelen op de juiste wijze t. o. v. elkaar opgesteld, dan kan een ijzeren elastisch lichaam, dat tusschen beide is opgesteld, in onderhouden trilling worden gebracht. Da C. A n d r a d e en S m i t h ¹⁾ brachten langs dezen weg ijzeren platen in trilling om daarbij de trillingswijze en de trillingsfiguren van C h l a d n i beter te kunnen demonstreeren. De veranderingen van roosterspanning, anodespanning en het magnetische veld kunnen de eigenfrequentie van de stemvork slechts binnen zeer enge grenzen doen wijzigen, de invloed van deze factoren is hierbij nagegaan door D y e ²⁾.

Voor uitvoerige uiteenzetting van de werking van een dergelijk genereerend triode-systeem, zooals ook voor allerlei andere doeleinden wordt toegepast, kan ik naar de radiotechnische handboeken verwijzen.

Bij mijn onderzoek is meestal het schema gevolgd, aangegeven in fig. 5. Zooals uit dit schema blijkt, bevindt de stemvork zich in het veld van de magnetische weekijzeren kernen P en R, die zich in den Plaat-, resp. in den Roosterkring bevinden. Door middel van den condensator C kan men een willekeurige frequentie instellen. Stelt men zóó in, dat de opgedrongen frequentie gelijk is aan de eigen

¹⁾ Proc. Physical Soc., Vol. 43 (1931), p. 405.

²⁾ Proc. Royal Soc., Vol. 103 (1923), p. 240; S c h e i b e, Jahrb. d. drahtl. Telegr. u. Telephonie, Bd. 29 (1927), p. 120 en 158.

frequentie van de stemvork (grondtoon), dan wordt deze gemakkelijk in onderhouden trilling gebracht. De grootte van de amplitude deed hierbij niet onder voor die aan het begin van een krachtigen aanslag; zoo b.v. bedroeg de

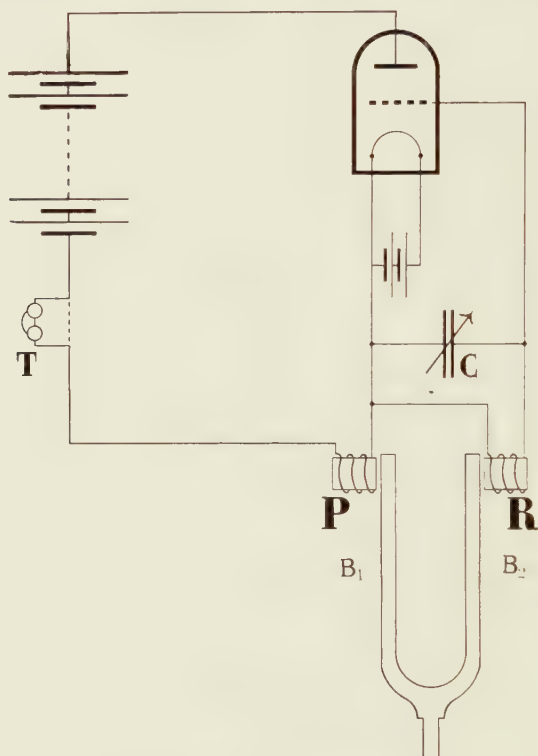


Fig. 5. Triode-aandrijfsysteem.

totale verplaatsing aan het beënuiteinde bij de stemvorken van Edelmann met de grondtonen 32, 96 en 256 v. d., resp. 8, 5 en $2\frac{1}{2}$ mm.

Treedt de frequentie van de wisselstroomen uit dit gebied van den grondtoon, dan wordt de eigen trilling snel uitgedempt. Maakt men nu de frequentie hooger, dan vindt men dat op bepaalde discrete punten nieuwe eigen trillingen optreden, zoo b.v. bij een ± 6.25 -voudige frequentie

de eerste boventoon. Steeds zal de stemvork in een of anderen boventoon gaan trillen wanneer de frequentie van de wisselingen van het magnetische veld het gebied van zoo'n boventoon heeft bereikt. Zoo kan men dus deze boventonen afzonderlijk te voorschijn brengen en hun eigenschappen bestudeeren. *Bij elk dezer boventonen toch wordt de trilling van de stemvork niet door die van den grondtoon of van een anderen boventoon verstoord.* Dat het geluid bij deze methode veelal zeer krachtig is bewijst de amplitudemeting, b.v. bij een stemvork met grondtoon 96 v. d. Hierbij bedroeg de uitwijking aan het vrije uiteinde meer dan 1 mm. voor den eersten boventoon (603 v. d.).

In fig. 5 is de eenvoudigste toepassing van den triode-generator voor het opwekken van boventonen voorgesteld. Voor sommige boventonen is de wijze van opstelling gunstiger als de spoel R in tweeën is gesplitst of als een der spoelen tusschen beide stemvorkbeenen is aangebracht.

In het triode-systeem kan de frequentie worden bepaald door tusschenschakeling van een telefoon T. Ook kan men met behulp hiervan het systeem afstemmen op een willekeurigen toon, die door een geijkten toongenerator of stemvork wordt aangegeven.

§ 3. *Registratie der niet-harmonische boventonen.*

De trillingen der boventonen die men zodoende laat optreden zijn te registreeren. Deze registratie kan dienst doen als objectieve methode voor toonhoogtebepaling, maar is vooral van waarde om de trillingswijze van verschillende punten van het stemvorkbeen aan te toonen. Zoo kan men nu ook de fasenverhouding vastleggen, die er bestaat tusschen twee punten, door b.v. van de beenuiteinden de trillingen gelijktijdig te registreeren. Dit alles is mogelijk bij een zuiveren boventoon, dus zonder dat de grondtoon of andere boventonen tegelijkertijd in de curve optreden.

Hier volgt de beschrijving van de eenvoudigste proefopstelling, zooals die bij de registratie der boventonen in de meeste gevallen is toegepast.

Aan het uiteinde van een der stemvorkbeenen wordt een smal strookje *zilverbladfolie* ¹⁾ vastgekit. Dit bevat evenals aluminiumfolie zeer vele microscopisch kleine gaatjes, waarvan er één als lichtpunt dienst doet. Vooraf was het zeer dunne zilverblad met 10 % arabische gomoplossing bevestigd op het celluloid van een stukje „Agfa”-film, dat van de gelatinelagen was ontdaan. Het materiaal was nu voldoende stevig en hiervan wordt nu een smal strookje aan het vrije uiteinde van het stemvorkbeen geplakt, zoodat het met het vlak van trilling samenvalt. Men kan het b.v. 6—8 mm. buiten het stemvorkbeen laten uitsteken, terwijl de breedte 2 mm bedraagt.

De proefopstelling laat zich beter beschrijven aan de hand van fig. 6. Van alle stemvorken en gebogen staven die zijn onderzocht is de steel steeds op dezelfde wijze geklemd geweest in een kokersysteem K ²⁾. De buitenste koker hiervan is stevig gevat door de klemschroef KS van een heugelstatief. Hiermee is de stand van de stemvork, die in de meeste gevallen verticaal was opgesteld, te

¹⁾ is te verkrijgen in een lijstenfabriek.

²⁾ Het is bij het onderzoek van sommige boventonen gewenscht dat de steel steeds op dezelfde wijze is bevestigd, daar het optreden van deze tonen verband houdt met de transversale bewegingen, die in den steel optreden.

Met behulp van een systeem dat uit twee metalen kokers bestaat wordt de steel geklemd in de richting van zijn lengteas, zoodat de transversale trillingen zoo weinig mogelijk op den buitensten koker overgaan. Tusschen deze onderdeelen zijn viltringen aangebracht. Het optreden van de transversale steeltrillingen blijft nu mogelijk. In fig. 6 is alleen de buitenste koker te zien. Deze draagt een schoefring, waarop cijfers zijn aangegeven. Met behulp van dezen ring wordt de binnenste koker en daarmee de steel in lengterichting geklemd.

Daar het hier een ander vraagstuk betreft, wordt hier niet dieper ingegaan op deze wijze van steelklemming.

regelen. De beenuiteinden bevinden zich tusschen de week-ijzeren kernen van de spoelen P en R, die in den plaat-, resp. roosterkring van het aandrijfsysteem zijn ingeschakeld. Van dit systeem zijn alleen de spoelen geteekend, het overige denke men zich bij *d* aangesloten volgens het schema fig. 5.

Fig. 6 geeft de eenvoudigste opstelling weer zonder splitsing van een der spoelen. De bevestiging van de spoelen is zoodanig, dat de afstand van de kernen tot den buitenkant van het stemvorkbeen met klemschroeven goed

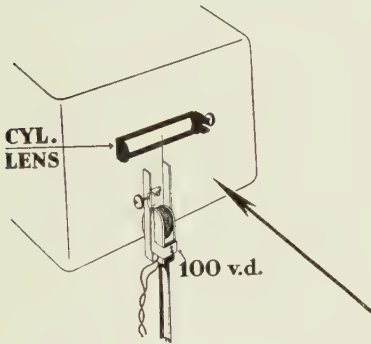


Fig. 6a. Registratie-apparatuur.

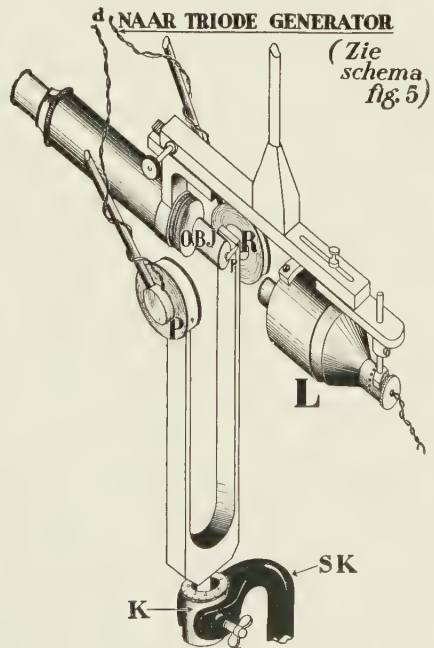


Fig. 6. Stemvorkopstelling met aandrijfsysteem. Projectie-apparatuur.

is te regelen. Bij p of op een andere plaats van het stemvorkbeen is een klein strookje zilverblad aan het been gekit als boven is beschreven. Een klein gedeelte van dit strookje zilverblad wordt sterk belicht door een belichtingsapparaat L. Dit bevat als lichtbron een in spiraal gewonden gloeidraad. Deze geeft een zeer intensief licht, vooral als de lamp iets overbelast wordt. Vóór deze lamp bevindt zich een condensor; deze is langs een sleuf in het statief zoo te verschuiven dat het brandpunt in het zilverbladfolie komt te liggen, waarop dus een beeldje van den gloeidraad verschijnt. De gaatjes in het folie worden nu tot lichtgevende puntjes. Met behulp van een projectiemicroscoop dat is opgesteld zooals de fig. aangeeft, verkrijgt men hiervan sterk vergroote beelden. Voor projectie- en fotografische registratie is van belang dat de lichtas en de optische as van de microscooplenzen samenvallen (schroeven voor centreering aan condensor en lamp). Verkeert de stemvork in trilling, dan wordt in het geprojecteerde beeld het lichtpuntje tot een horizontale lijn. Voor vergrooting tot 300 à 400 maal kan men met objectief-lenzen volstaan (sterke „droge” lenzen met eigen vergrooting tot 90 maal). Voor sterkere vergrooting en voor amplitude-metingen werden tevens projectie-oculaires voorgeplaatst. Het folie moet steeds naar de objectieflens zijn toegekeerd, daar het celluloid zekere dikte heeft en er anders bij de sterke vergrootingen contact met de lens mogelijk is.

In het apparaat voor de fotografische registratie (fig. 6a) wordt het lichtgevoelige materiaal achter een horizontale spleet voortbewogen. Men kan daarom steeds met voordeel gebruik maken van een zeer fijn verticaal scheurtje in het zilverbladfolie. Deze reetjes in het folie loopen meest alle in dezelfde richting, men kan het strookje van te voren zoo knippen, dat de richting naar wensch is. Heeft men een lichtpuntje gekozen, dan valt dikwijls een gedeelte van de beeldlijn buiten de horizontale

spleet, omdat aan de uiteinden van de stemvorkbeenen en ook op bepaalde andere plaatsen de richting van de beweging niet volkomen horizontaal is. Om nu toch de trilling in haar geheel op te schrijven, zou men het diafragma van de spleet wijd open moeten zetten. Ook hierbij zijn goede curven te verkrijgen.

Voor de spleet van het opname-apparaat bevindt zich een cylinderlens, de brandpunten hiervan liggen in het niveau van het registratiepapier. Verder is er nog een electromagnetisch gedreven stemvork verticaal opgesteld, deze dient voor tijdregistratie; het aantal trillingen, vooraf gepreciseerd, is hierbij 100 per sec. Een der beenen van deze stemvork is aan het uiteinde met een aluminium-wijzertje verlengd. Dit bevindt zich in den lichtbundel vlak voor de cylinderlens, zoodat de stralengang periodiek onderschept wordt, hetgeen zich als een schaduwlijntje door de trillingen van den boventoon afteekent, zie b.v. fig. 13.

§ 4. *Registratie der trillingen van beide stemvorkbeenen.*

Tot dusverre heb ik alleen een methode beschreven, waarbij de boventoontrilling van een punt van het stemvorkbeen werd geregistreerd. Voor het inzicht in de trillingswijze van de stemvork is het van meer belang om bij elken boventoon de trilling van twee symmetrische punten, b.v. van de beenuiteinden, tegelijkertijd te registreren. Dit kan men op de volgende wijze bereiken:

Aan de beenuiteinden worden twee smalle reepjes bladstaal vastgekit. Deze maakt men zich uit een veiligheids-scheermesje, door dit in dwarse richting in te knippen. De beide reepjes, die 3—4 mm breed kunnen zijn, bevestigt men met syndetikon aan de beenuiteinden zóó, dat de scherpe kanten, die naar elkaar toe zijn gekeerd, een zeer smalle spleet tusschen zich laten (fig. 7). Deze

spleet wordt intensief belicht; met het oog op de trillingsrichting is het gewenscht, dat het beeldje van de gloei-draadspiraal een horizontaal verloop heeft. De bewegingen

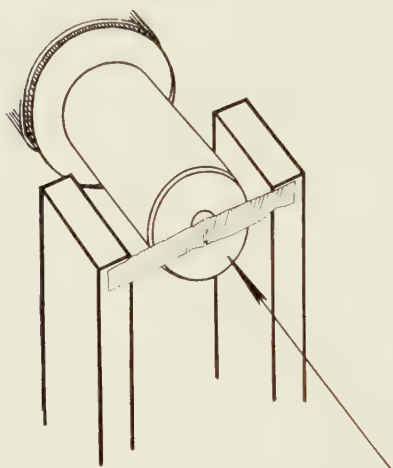


Fig. 7. Methode voor registratie der trillingen van *beide* beenen.

van de lichtspleet worden gefotografeerd op dezelfde wijze als boven voor de spleetjes in het folie is uitgezet.

Heeft men een boventoontrilling opgewekt en bewegen daarbij de beenuiteinden zich t.o.v. elkaar in tegengestelde richting, dan ziet men dit op de fotografie weergegeven aan de spleetbegrenzing. Deze is nl. zoodanig, dat de spleet zich achtereenvolgens verwijdt en vernauwt (zie b.v. fig. 15, onderste foto).

Heeft men met een boventoon te doen waarbij de beenuiteinden zich t. o. v. elkaar steeds in denzelfden zin bewegen, dan behoudt het beeld van de spleet in de fotografie overal dezelfde breedte (zie b.v. fig. 14). Bij deze boventonen zijn de beide spleetranden dus t. o. v. elkaar niet van plaats veranderd, deze spleet is hier dus volkomen te vergelijken met een reetje in het folie, dat aan één been was bevestigd. Evenals hier geeft het verloop van het spleetbeeld de boventoontrilling weer, met dit verschil dat de breedte van de spleet groter is.

Deze registratie vanaf de beide stemvorkbeenen is alleen mogelijk wanneer de beide stukjes bladstaal zoodanig aan de beenuiteinden zijn vastgehecht, dat ze volkomen in eenzelfde vlak gelegen zijn, zoodat de begrenzingsen van de spleet in het beeld tegelijk scherp zijn in te stellen. Dit levert eenige moeilijkheden op, vooral als

men met sterke vergrooingen werkt. Het bladstaal laat weinig verbuiging toe. Men moet de stukjes bladstaal gedurende het indrogen van de kleefstof t. o. v. elkaar fixeeren of zoo noodig aan het eene beuuiteinde wat meer kleefstof aanbrengen. Zoo verkrijgt men tenslotte een scherp beeld van beide spleetranden.

Deze methode kan dus tevens dienst doen voor registratie van de boventoontrilling.

De spleetbreedte, welke gekozen is, heb ik afhankelijk gesteld van de vergrooing waarmee wordt gewerkt. Deze breedte bedroeg bij het onderzoek 50—200 μ .

§ 5. *Een andere methode.*

Een methode waarbij de boventonen van de stemvork afzonderlijk worden opgewekt, als in dit hoofdstuk is aangegeven, was tot dusverre niet toegepast, voorzover ik in de literatuur kon nagaan. In den allerlaatsten tijd (Jan. 1933) echter werd mededeeling gedaan van een andere methode, waarbij het bij sommige stemvorken gelukte, deze ook uitsluitend in een boventoon te laten trillen, echter alleen in de eerste (niet-harmonische). De werkwijze welke hierbij werd gevolgd is een totaal andere. Deze methode is afkomstig van Mary D. Waller¹⁾. Zij bracht elastische lichamen als stemvorken, staven, platen en ringen in onderhouden trilling door deze in aanraking te brengen met vast koolzuur. Het uiteinde van een stemvorkbeen werd tegen zulk een blok koolzuur aangehouden: de stemvork gaf dan den grondtoon aan of in sommige gevallen alleen de eerste boventoon, dit hangt onder meer af van de toonhoogte van de stemvork en vooral van het soortelijk gewicht van het vaste koolzuur dat men bezigt. Het optreden van de trillingen zou zijn te verklaren doordat het vaste koolzuur (temp. —80°) sterk

¹⁾ Proc. Physical Society, Vol. 45, Part 1 (Jan. 1933).

gaat sublimeeren op het oogenblik van het contact met het stemvorkmetaal. Men kan zich voorstellen dat door de hooge dampspanning op de plaats van aanraking het stemvorkbeen uit zijn evenwichtstoestand wordt gebracht. Op analoge wijze als b.v. bij een electro-magnetisch gedreven stemvork, treedt nu een trilling op, die onderhouden wordt doordat het gas steeds opnieuw wordt gevormd en weer ontwijkt. De stemvork laat zich hierdoor pas in trilling brengen wanneer de frequenties van dit systeem in het gebied liggen van haar grondtoon of in dat van haar eersten boventoon en pas dan is het mogelijk de stemvork in dezen boventoon te laten aanspreken. In zooverre is deze methode dus eenigszins te vergelijken met het aandrijfsysteem voor boventonen door bijzondere toepassing van de triode, als boven is beschreven.

Bij deze methode is het soortelijk gewicht van het stuk vast koolzuur wat men gebruikt van veel belang. Is dit onder hoogen druk samengeperst geweest, dus van groote dichtheid, dan kan men inzien, dat het veel warmte aan de stemvork zal onttrekken, wat van invloed zou kunnen zijn op de dampvorming aan het oppervlak en op de dampspanning, en daarmee op de frequenties van het systeem. Vandaar dat men met een blok van groot s.g. alleen vrij hooge stemvorken in trilling brengt of daarmee bij lagere stemvorken alleen den eersten boventoon opwekt.

Daar er tusschen deze methode en de bovenvermelde eenige overeenkomst bestaat wat het optreden van een der boventonen aangaat heb ik ze bij een aantal stemvorken toegepast en daarbij vooral op de boventonen gelet. De sneeuw die ik opving uit een koolzuurcylinder werd in een koker met behulp van een stamper met groote kracht tot „ijs" samengeperst. Ook werden zachtere stukken verkregen door hierbij iets minder groote kracht aan te wenden. Het geluid is het krachtigst als men een rand

of hoekpunt van een stemvorkbeenuiteinde of een plaats hier onmiddellijk onder met gelijkmatigen zachten druk tegen het koolzuurblok aanhoudt.

De grondtoon was goed waar te nemen bij de stemvorken c^3 tot c^5 ; bij de stemvorken c^4 en c^5 werd deze soms zeer krachtig weergegeven. Bij de stemvork c^3 gelukte het met behulp van een vrij vast blokje alleen de eerste (niet-harmonische) boventoon te hooren en aan te toonen door de zwevingen met een toongenerator.

De stemvorken c , c^1 en c^2 waren niet in den grondtoon in trilling te brengen, meestal werd alleen een zwak krakend geluid waargenomen: wel gelukte het bij beide laatstgenoemde vorken met behulp van een harder stukje koolzuur dit geruisch plaats te laten maken voor den eersten (niet-harmonischen) boventoon.

Met behulp van deze methode is het alleen mogelijk gebleken de eerste boventoon op te wekken. Ook wat de regelbaarheid der eigen-frequenties van het systeem betreft staat deze overigens interessante methode verre ten achter bij die met gebruikmaking van de triodelamp.

HOOFDSTUK IV.

EIGEN ONDERZOEKINGEN OVER BOVENTONEN BIJ STEMVORKEN.

§ 1. *Onderzoekingen bij omgebogen staven.*

Bij dit onderzoek naar de trillingswijze bij de stemvork zijn de boventonen eerst nagegaan bij omgebogen staven.

Het staafmateriaal, dat gebruikt werd, is van ijzer en heeft een breedte van 15 mm, de dikte is 5 mm. Dit is omgebogen tot U-vormige staven. Bij dit gedeelte van het onderzoek is in hoofdzaak gebruik gemaakt van twee exemplaren van verschillende afmetingen.

De omgebogen staaf, die genoemd is stemvork „V”, heeft, gemeten tot aan de plaats van steelaanhechting, een lengte van 290 mm en de afstand tusschen beide beenen bedraagt 28 mm.

Bij een andere staaf, die als stemvork „K.M.” is gemerkt, zijn deze afmetingen resp. 195 en 20 mm.

Bij „stemvork V” zijn aan de plaats van ombuiging achtereenvolgens drie verschillende systemen van steelaanhechting aangebracht, en zoo worden bij dit onderzoek steeds drie gevallen onderscheiden (fig. 8) te weten:

Geval 1: midden in de plaats van ombuiging is een steel geschroefd. Dit is de oudste vorm die voor stemvorken gebruikt werd.

Geval 2: de staaf is op twee plaatsen bevestigd en wel in de knooppunten van den grondtoon. Dit zijn de beginplaatsen van ombuiging aan den voet van elk been. Op deze plaatsen zijn aan de staaf de beide scherpe punten van een „aanzetstuk” gesoldeerd, zoodat de plaatsen van

contact hiermee zoo klein mogelijk zijn. Aan dit aanzetstuk is een steel bevestigd als in fig. 8 is voorgesteld. Deze wijze van bevestiging van den stemvorksteel werd mij door *Prof. Benjamins* aangegeven.



Geval 3: aan de plaats van ombuiging is een breed massief ijzeren „hart” gesoldeerd. Dit lichaam, dat zich om de geheele ombuiging volkomen aansluit, draagt in het midden een steel. Deze vorm komt het meest overeen met de eigenlijke stemvork. Deze wijze van steelaanhechting, door *König* aangegeven, wordt tegenwoordig bijna algemeen bij stemvorken toegepast.

Bij alle drie gevallen is de steel geklemd in een kokersysteem als in hoofdst. III is aangegeven. De omgebogen staaf is verticaal opgesteld, de beëndeinden bevinden zich tusschen de kernen der spoelen *P* en *R* van het elektrische aandrijfsysteem. De trillingen worden niet dadelijk geregistreerd, maar eerst alleen de toonhoogte bepaald met behulp van de zwevingen die kunnen ontstaan door superpositie met de tonen van den toongenerator van *Philips*. Hiervan kan de toonhoogte op een ijkcurve worden afgelezen.

Begonnen wordt met de steelbevestiging volgens

Geval 1. Het aandrijfsysteem is zoodanig ingesteld, dat de omgebogen staaf krachtig in den grondtoon in trilling geraakt en na verloop van enkele oogenblikken is hierbij de grootst mogelijke amplitude bereikt (9 mm). Het blijkt dat de grondtoon 40 is.

Bij de waarneming valt aanstonds op dat dit geluid vrij zuiver is: behalve de zwakke geluidsindruk die deze lage toon maakt, neemt men weinig waar. Wordt deze zelfde staaf door aanslag met een hamer in trilling gebracht, dan overweegt de geluidsgewaarwording door den eersten niet-harmonischen boventoon. Is de triodegenerator op de frequentie van den grondtoon zuiver ingesteld, dan is deze boventoon in het geluid niet aanwezig. Ik kom hier later op terug (§ 3 van dit hoofdst.).

De beide knopen van den grondtoon bevinden zich iets boven de beginplaatsen van ombuiging. Beter nog dan door auscultatie zijn ze bij deze lage tonen te vinden met behulp van lichte aanraking met den vingertop.

Wordt het aandrijfsysteem nu op een frequentie ingesteld, die iets hooger is dan de grondtoon, dan wordt de trilling niet langer onderhouden, maar trilt de stemvork in den grondtoon uit. Gaat men nu door met het opvoeren van de frequenties, dan zijn achtereenvolgens de volgende boventonen afzonderlijk op te wekken.

1. Boventoon 266; 4 knopen: op $5\frac{1}{2}$ cm vanaf de beënuiteinden en bdz. in de ombuiging, iets lager gelegen dan bij den grondtoon. Men kan de knooppunten in 't algemeen zeer nauwkeurig bepalen, wanneer men het nauwe uiteinde (3 mm doorsnede) van een auscultatiebuisje langs het geheele stemvorkbeen verplaatst. Men luistert nu naar de zwevingen, die optreden met den toon van een toongenerator. Deze is zoo ingesteld, dat de boventoon hiermee enkele zwevingen, b.v. 4 per seconde, doet ontstaan. Ter hoogte van de knoop hoort men dan ineens geen zweving meer.

2. Boventoon 532 (fig. 9 en fig. 10); 5 knopen: op 4 en 15.6 cm. vanaf de beënuiteinden en in het midden van van de ombuiging. Het geluid is veel zwakker dan dat bij den eersten boventoon. Midden in de plaats van ombuiging tegenover de steelaanhechting bluscht het geluid geheel uit, in tegenstelling met den vorigen en ook met den

volgenden boventoon, waarbij op die plaats duidelijk weer zwevingen zijn waar te nemen.

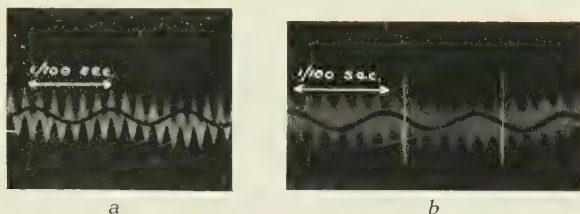


Fig. 9. Stenvork „V”; geval 1, boventoon 532.

Fig. 9a geeft de registratie weer van dezen boventoon. De trillingen zijn ook van beide beenen tegelijkertijd geregistreerd (fig. 9b) met behulp van de lichtspleet tusschen de stukjes bladstaal, die hier aan de beenuiteinden waren bevestigd (zie hoofdst. III en fig. 7). Om de richting der uitwijkingen duidelijker aan te geven is door de trillingscurven van beide beenen steeds een wit lijntje getrokken, dat de trillingsrichting op een bepaald tijdstip mede aan toont. Zoo is dus objectief aangetoond, dat bij dezen boventoon de bewegingen aan beide beenen steeds in dezelfde richting plaats vinden.

De proeven met het dubbele auscultatiebuisje vlg. L i n d i g, dat het geluid van twee plaatsen uit naar één oor voert, zijn bij deze afzonderlijke boventonen veel meer overtuigend dan bij het samengestelde geluid (vgl. ook de tekst bij fig. 3, hoofdst. I).

Stelt men de buisjes bij P en T op (fig. 10), dan wordt het geluid uitgedoofd en men hoort het weer toetreden als het eene buisje wordt weggetrokken. Hetzelfde is het geval als men tegelijkertijd bij P en U ausculteert en daarna het eene buisje wegtrekt.

Luistert men met één buisje bij R of bij V, dan neemt men geen geluid waar. Ook de andere punten van het interferentievlak zijn nu door auscultatie gemakkelijk te

bepalen. Het blijkt, dat er bij dezen boventoon met oneven aantal knoopen slechts één interferentievlak bestaat, dat midden tusschen de beide beenen verloopt en loodrecht staat op het vlak van trilling (als reeds in fig. 2b is voorgesteld).

Men kan de proef ook zoo inrichten dat men de stemvork met de beenuiteinden naar beneden gericht opstelt en de spoelen van het aandrijfsysteem niet aan de uiteinden, maar ter hoogte van U en V (fig. 10) aanbrengt, dus ter plaatse van een anderen buik. Brengt men nu de uiteinden in aanraking met een wateroppervlak, waarop wat lycopodiumpoeder is gestrooid, dan ziet men tusschen de wervelbewegingen dit mediane interferentievlak aangegeven.

Daarentegen is bij een boventoon met een even aantal, b.v. bij die met 4 knoopen, goed te zien dat er evenals bij den grondtoon 2 interferentievlakken zijn met een gekromd verloop (als in fig. 2a).

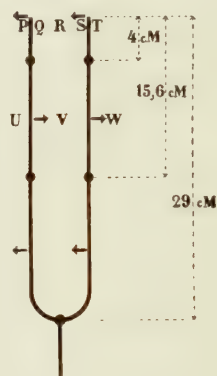


Fig. 10.
Stemvork „V”: geval 1, boventoon 532.

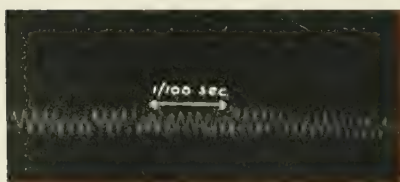


Fig. 11. Stemvork „V”: geval 1, boventoon 780.

3. Boventoon 780 (fig. 11); 6 knoopen: op 3,8 cm. en 14,8 cm. vanaf de beenuiteinden en bdz. in de ombuiging. De beenen bewegen zich t. o. v. elkaar in tegengestelde richting.

4. Boventoon 1028; 7 knoopen: op 2,8 cm., 12,2 cm. en 23,3 cm. vanaf de beenuiteinden en in het midden van de ombuiging. De bewegingen der beenen zijn gelijk gericht.

5. Boventoon 1520; 8 knoopen: op 2,3 cm., 11 cm., 19 cm. en bdz. in de ombuiging. De beide laatstgenoemde

knoopen komen dus steeds lager te liggen. Ausculteert men ter hoogte van één dezer knoopen aan de binnenzijde van de staaf en gaat men verder naar het mediane punt in de ombuiging, dus ter hoogte van de steelaanhechting, dan hoort men hier het geluid weer duidelijk optreden (buik). De beenen bewegen zich tegengesteld.

6. Boventoon 1875; 9 knoopen: op 2 cm., 10 cm., 17,2 cm. en 25,3 cm. vanaf de beenuiteinden en in het midden van de ombuiging. Bij dezen boventoon, die vrij zwak is, kan men de knooppunten toch zeer nauwkeurig bepalen met de methode die boven is aangegeven. De zwevingen, die men ausculteert en die optreden met den toon van een toongenerator, geven een veel krachtiger geluidswaarneming dan de boventoon alleen.

In sommige gevallen is het gemakkelijker een boventoon op te wekken, indien de spoel R (fig. 5) in tweeën uitgevoerd wordt, waarbij het eene gedeelte van de spoel tusschen de beenen wordt geplaatst, nl. aan den binnenkant van het been B_2 en het andere gedeelte aan de buitenzijde van het been B_1 te samen met de spoel P (zie fig. 5). Deze wijze van opstelling is speciaal voor de boventonen waarbij de uitwijkingen aan de beenuiteinden in dezelfde richting plaats vinden; het bleek dat deze nu gemakkelijker waren op te wekken. *Hiermee werd in het frequentiegebied tusschen grondtoon en z.g. „eersten” boventoon nog een andere boventoon gevonden, nl.:*

7. Boventoon 137; men kan dezen toon evenals de hoogere boventonen als een enkelvoudige trilling doen optreden. Ook is de grond-

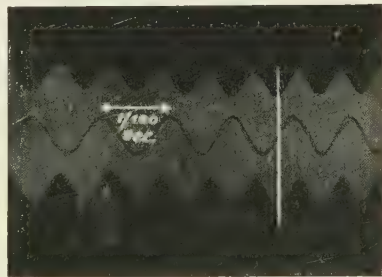


Fig. 12. Stemvork „V”; geval 1, boventoon 137. (Verg. 60×).

toon niet in de registratiecurve te zien. *Het aantal knopen is 3.* Deze bevinden zich: aan elk been op 9.8 cm. vanaf het uiteinde en de derde in het midden waar de steel is aangehecht. De trillingen van beide beenen zijn ook gelijktijdig geregistreerd (fig. 12). Hieruit blijkt:

ten 1e, dat de beide beenen zich in dezelfde richting bewegen, evenals bij de hogere boventonen met een oneven aantal knopen.

ten 2e, dat deze trilling met een vrij groote amplitude is op te wekken.

Geval 2. Door de bevestiging van de twee punten van het aanzetstuk aan de kromming van de staaf is de grondtoon slechts weinig gewijzigd. De toonhoogte is nu 42.

Het blijkt dat de trilling in elk der boventonen met een oneven aantal knopen nu niet meer is op te wekken. Alleen de boventoontrillingen met even aantal knopen, waarbij dus in het midden van de ombuiging een buik wordt gevormd, kunnen nog optreden. Op deze plaats kan geen knoop meer worden gevormd, daar nu elke stoot of beweging die aan het stemvorkbeen wordt meegedeeld, in deze plaats tusschen de beide steunpunten een verplaatsing tengevolge heeft. Hier is dus alleen een buik mogelijk.



Fig. 13. Stemvork „V”; geval 2, boventoon 1458. (Vergr. 310×).

De trillingswijze die bij de boventonen van geval 2 werd gevonden is hiermee ook in overeenstemming: evenals bij den grondtoon vond de beweging van beide beenen steeds in tegengestelde richting plaats.

De toonhoogten die zijn gevonden wijken slechts weinig af van die bij de overeenkomstige boventonen van geval 1.

De knooppunten hebben zich haast niet verplaatst, de ligging is hier niet weer vermeld. De beide knooppunten aan den voet van de stemvorkbeenen zijn nu echter steeds in de plaatsen gelegen, waar het aanzetstuk is vastgehecht.

1. Boven-ton 268; 4 knoopen.
2. Boven-ton 771; 6 knoopen.
3. Boven-ton 1458; (fig. 13); 8 knoopen.

Geval 3. De grondtoon is nu 43. Het blijkt dat de boventonen met een mediaan gelegen knoop wel kunnen optreden, ook is een boventoon met 3 knoopen gevonden. Het is niet gelukt een boventoon met 9 knoopen afzonderlijk op te wekken zooals bij geval 1, zoodat hier ook de ligging der knoopen niet goed kon worden vastgesteld.

Heeft men de stemvork in een dezer hooge boventonen in trilling gebracht en zijn de knooppunten opgezocht, dan kan men wanneer dit gewenscht is, het geluid krachtiger maken door deze punten een weinig te fixeeren. Daartoe legt men ter hoogte van elke knoop een smal rubberbandje om de beide beenen gezamenlijk aan. Stelt men nu de magneetkernen van het aandrijfsysteem zoo dicht mogelijk naast de beenuiteinden op, dan treedt deze boven-tontrilling met grooter amplitude op dan te voren.

De onderlinge verhoudingen der frequenties wijken voor de meeste boventonen slechts weinig af van die bij geval 1. Een uitzondering hierop maakt:

1. Boven-ton 187; 3 knoopen. Deze bevinden zich aan elk been op 9,5 cm vanaf het uiteinde, terwijl de derde in het „hart” gelegen is. De bewegingen van beide beenen zijn gelijktijdig geregistreerd (fig. 14).

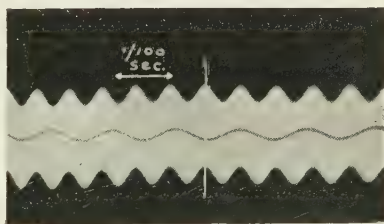


Fig. 14. Stemvork „V”; geval 3, boventoon 187. (Vergr. 60×).

Dezelfde trillingswijze is waar te nemen bij de boventonen met 5 en 7 knoopen, terwijl bij de tonen met 4, 6 en 8 knoopen de beweging der stemvorkbeenen weer tegen-

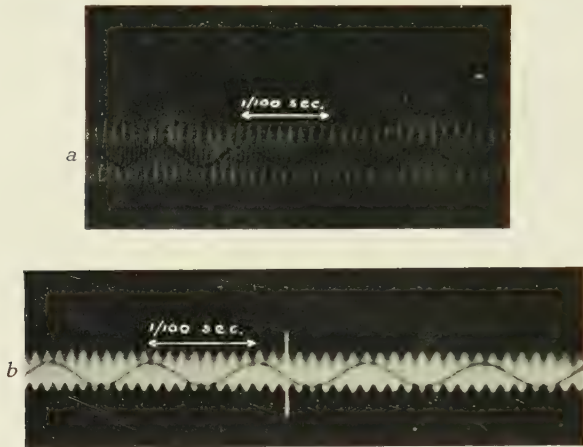


Fig. 15. Stemv. „V”; geval 3, boventoon 805.
(Vergr. 290×).

gesteld is. Hier volgen de gegevens voor de andere boventonen die bij deze stemvork afzonderlijk waren op te wekken.

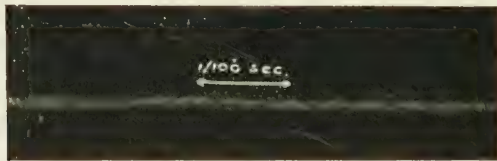


Fig. 16. Stemv. „V”; geval 3, boventoon 1625.
(Vergr. 350×).

2. Boventoon 276; 4 knoopen.
3. Boventoon 525; 5 knoopen.
4. Boventoon 805 (fig. 15a); 6 knoopen. De trilling is aan beide beenen tegengesteld gericht (fig. 15b registratie vanaf beide beenen).

5. Boventoon 1020; 7 knoopen.

6. Boventoon 1625 (fig. 16); 8 knoopen.

De frequenties der boventonen die bij de stemvork „V” met behulp van den triodegenerator werden opgewekt, zijn in verhouding tot den grondtoon (n_0) aangegeven in tabel 2.

Aantal Knoopen . .	Grond- toon	Boventonen						
	2	3	4	5	6	7	8	9
Geval 1	$n_0 = 40$	$3,4n_0$	$6,65n_0$	$13,3n_0$	$19,5n_0$	$25,7n_0$	$38n_0$	$46,9n_0$
Geval 2	$n_0 = 42$		$6,4n_0$		$18,4n_0$		$34,7n_0$	
Geval 3	$n_0 = 43$	$4,35n_0$	$6,4n_0$	$12,2n_0$	$18,7n_0$	$23,7n_0$	$37,7n_0$	

 = niet gevonden.

Tabel 2. Stemvork „V”. Verhoudingen der boventonen bij drie verschillende gevallen.

Uit deze tabel blijkt

ten 1e, er bestaat vrij groote overeenkomst tusschen de toonhoogten bij de drie gevallen. Bij geval 3 zijn de relatieve toonhoogten iets lager dan bij geval 1. Ze komen bij geval 3 het meest overeen met de boventonen, die ik later bij de stemvorken van Edelmann heb gevonden.

ten 2e, er zijn bij geval 2 geen boventonen op te wekken met een oneven aantal knoopen.

ten 3e, zoowel bij geval 1 als bij geval 3 is een boventoon met 3 knoopen aangetoond. Hierbij valt op, dat bij beide gevallen de verhouding tot den grondtoon nogal verschillend is, terwijl deze verhoudingen bij de andere boventonen in beide gevallen zeer weinig uiteenloopen.

Deze boventonen met 3 knoopen zijn dan ook niet geheel op één lijn te stellen met de andere niet-harmonische

boventonen die hierboven zijn aangegeven. Ik kom hier nader op terug bij het onderzoek der boventonen bij de stemvork (§ 2).

§ 2. *Onderzoekingen bij stemvorken van Edelmann.*

Bij de stemvorken van E d e l m a n n bevindt zich ter plaatse van de steelaanhechting een breed massief „hart” als door K ö n i g is aangegeven. Deze vorm komt overeen met geval 3 van mijn onderzoek.

Bij het onderzoek van deze stemvorken zijn voorloopig de loopgewichten niet aangebracht.

Stemvork g ($n_0 = 192$). De boventonen die achtereenvolgens werden gevonden zijn aangegeven in tabel 3.

		Grond- toon	Boventonen					
Aantal Knoopen		2	3	4	5	6	7	8
Toonhoogten	abs. . .	192	482	1207	2306	3320	4780	6390
	relat. . .	n_0	$2,5n_0$	$6,28n_0$	$12n_0$	$17,3n_0$	$24,8n_0$	$33,3n_0$

Tabel 3. Boventonen bij de stemvork g van Edelmann.

De hoogteverhoudingen bij de boventonen met 4, 5, 6, 7 en 8 knoopen vertoonen overeenkomst met die welke bij stemvork „V”, geval 3 zijn gevonden. Evenals daar zijn bij deze stemvork van E d e l m a n n dus ook boventonen met oneven aantal knoopen aangetoond (5 en 7 knoopen).

Ausculteert men bij deze beide boventonen mediaan in het laagste punt van de ombuiging (de zg. „top”) dan hoort men hier geen zwevingen met het geluid van een toongenerator (knoop); gaat men, ausculteerende, van hieruit naar het laagste punt van de stemvorkbeenen dan hoort men de zwevingen weer optreden. Bij deze tonen zijn de bewegingen aan beide beenen gelijk gericht.

Bij de boventonen met 4, 6 en 8 knoopen vinden de bewegingen aan beide beenen t.o.v. elkaar steeds in tegengestelde richting plaats. Het valt niet op dat bij deze boventonen het geluid (physiologisch) veel krachtiger is dan bij de boventonen met 5 en 7 knoopen. Een uitzondering moet gemaakt worden voor den zg. „eersten” boventoon (4 knoopen) waarbij de amplitude meestal veel grooter is. Deze toon, die altijd de eerste boventoon genoemd wordt is in werkelijkheid niet de eerste, zooals uit de tabel 3 valt op te maken. Er is nl. gemakkelijk een

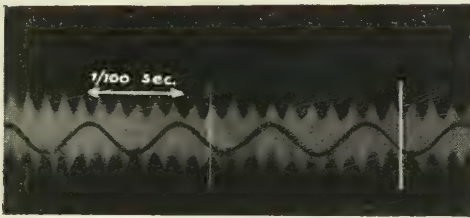


Fig. 17. Stenvork *g* (Edelmann); boventoon 482 (3 knoopen). Vergr. 50 $\times$.

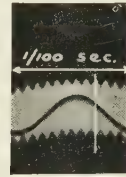


Fig. 18. Stenv. *g* (Edelmann); boventoon 1207 (4 knoopen). Vergr. 200 $\times$.

boventoon met 3 knoopen aan te toonen. Hierbij zijn de trillingen van de beide beenuiteinden gelijktijdig geregistreerd (fig. 17). Uit deze foto blijkt

ten 1e, de beenuiteinden bewegen zich in dezelfde richting;

ten 2e, deze trilling is op te wekken met een behoorlijk groote amplitude. De trillingswijze van den boventoon met 4 knoopen is aangegeven in fig. 18. Vergelijkt men de trillingswijzen bij fig. 17 en 18 dan is het verschil duidelijk.

Bij den boventoon met 3 knoopen bevindt zich aan elk stenvorkbeen een knoop, gelegen op 4,8 cm vanaf het beenuiteinde. De lengte van het stenvorkbeen is 15 cm. De ligging van de derde knoop komt overeen met die van de mediaan gelegen knoop bij de boventonen met 5 en 7

knoopen. Toch is de trillingswijze bij de toon met 3 knoopen niet geheel te vergelijken met die bij 5 en 7 knoopen.

Wanneer men ziet welke plaats deze boventoon met 3 knoopen in tabel 3 inneemt, dan is het wel opvallend dat deze toon juist „past” in de plaats die in het schema van Chladni en Helmholtz is opengelaten (zie schema fig. 1). Deze boventoon zou zich volgens dit schema tot den grondtoon moeten verhouden als $2^2 : 1^{11} \cdot 25$ of als $2,7 : 1$. Bij den boventoon die bij de stemvork is gevonden is deze verhouding tot den grondtoon als $2,5 : 1$. Het is gebleken dat dit steeds de eenige boventoon is die in het frequentiegebied tusschen grondtoon en zg. eersten boventoon is aan te toonen. Deze toon is niet alleen bij de stemvork g maar ook bij andere stemvorken van Edelmann gevonden en steeds werd ongeveer dezelfde frequentieverhouding tot den grondtoon aangetroffen; bij de meeste stemvorken is de overeenstemming met de verhouding $2,7n_0$ zelfs beter dan bij de stemvork g (zie tabel 4).

Grondtoon (n_0)		G (96)	c (128)	g (192)	c^1 (256)	g^1 (384)
Boventoon	abs. freq. .	248	515	482	653	1035
	relat. „ .	$2,6n_0$	$2,46n_0$	$2,5n_0$	$2,55n_0$	$2,7n_0$
Lengte stemvorkbeen . .		22,7 cm	20 cm	15 cm	13,5 cm	11 cm
Afstand der knoopen tot beenuiteinde		7 cm	6,8 cm	4,8 cm	4 cm	3,6 cm

Tabel 4. Boventonen met 3 knoopen bij stemvorken van Edelmann.

Zooals uit de tabel blijkt is ook de ligging der knoopen constant evenals dat bij de hoogere boventonen het geval is. Ze liggen hier steeds op ongeveer een derde van de lengte van het stemvorkbeen, gemeten vanaf het beenuiteinde.

Er bestaat echter een belangrijk punt van verschil met de andere boventonen, ook met de boventonen met 5 en 7 knoopen. *Het is nl. gebleken, dat de steellengte van invloed is op de frequentie van dezen boventoon.* Verlengt men den steel met een staafgedeelte van ijzer of eboniet dan gelukt het opwekken van denzelfden toon bij deze stemvorken niet, ook al is de triodegenerator ingesteld op precies dezelfde frequentie waarmee deze boventoon tevoren werd gevonden. Het blijkt dat er wel een andere toon kan optreden met dezelfde trillingswijze en eveneens met 3 knoopen, maar de frequentie is door de steelverlenging afgenomen tot bv. $2,3n_0$. *Deze boventonen met 3 knoopen (tabel 4) zijn dus alle te beschouwen als zg. staaf- of steeltonen* (zie hoofdstuk I § 3).

Ook bij de stemvork „V” zijn deze boventonen met 3 knoopen gevonden, nl. bij de gevallen 1 en 3. (Zie § 1 van dit hoofdstuk, de tekst bij fig. 12 en fig. 14.) De verhoudingen tot den grondtoon waren bij deze tonen in beide gevallen nogal verschillend nl. $3,4n_0$ en $4,35n_0$ (tabel 2). Dit is te verklaren doordat ook bij deze gevallen de steel verschillende afmetingen heeft daar de wijze van aanhechting verschillend is. Ook hier daalt de toonhoogte als men den steel langer maakt.

Daar bij deze tonen de bewegingen bij de beide beenen gelijk zijn gericht, is de steel als het verlengde van elk der beenen te beschouwen. Deze „staaf” heeft hier dus twee knoopen. Het optreden der transversaaltrilling aan het steeluiteinde is door auscultatie goed waarneembaar en deze heeft dezelfde phase als die van het uiteinde der stemvorkbeenen (auscultatie met twee buisjes vlg. Lindig).

Bij het opwekken van dezen boventoon bij verandering der steellengte was de steel steeds ter plaatse van de steelaanhechting in een viltring bevestigd.

De transversale steeltrilling is nog geen bewijs voor het aanwezig zijn van een staaf- of steeltoon. Is de steel zoodanig

P. Hacquabord, Diss. 5

bevestigd dat steeltrillingen mogelijk zijn dan treden in den steel steeds transversale trillingen op (zie hoofdstuk I, §3). Ook bij mijn onderzoek was dit het geval. *Elke* niet-harmoonische boventoon die werd gevonden ging ook als een transversale trilling op den steel over. Bij deze tonen werd echter de toonhoogte niet beïnvloed door verandering van de steel-lengte. Dit was wel het geval bij den boventoon met 3 knoopen.

De trillingswijze van de stemvork waarbij 3 knoopen optreden werd door de vroegere onderzoekers niet gevonden (zie fig. 1 en tabel 1). Wel heeft A n d e r s o n ¹⁾ in dit frequentiegebied ($2,5n_0—3n_0$) een boventoon waargenomen. Deze trad op bij lage stemvorken en na een bepaalde wijze van aanslaan (hoofdstuk II, § 2). Het is wel merkwaardig dat A n d e r s o n dezen toon de „stem-overtone” noemt, omdat hij vond dat deze transversale trilling in sterke mate op den steel overging. Ook viel het hem op dat bij de verschillende stemvorken de relatieve frequentie van dezen toon veel minder constant is dan bij den zg. eersten boventoon. Hij heeft het bestaan van dezen toon niet objectief aangetoond.

Ook bij de andere stemvorken van E d e l m a n n zijn de boventonen door aandrijving met behulp van de triode onderzocht. De relatieve frequenties die hierbij zijn gevonden wijken zeer weinig af van die bij de stemvork *g* zijn aangegeven (tabel 3). Daarom zijn deze verhoudingen hier alleen voor deze stemvork weergegeven.

§ 3. *Verschil in toonzuiverheid bij stemvorktrilling door elektrische aandrijving en door hameraanslag.*

Is de triode-generator zoodanig ingesteld dat een stemvork krachtig in den grondtoon in trilling wordt gebracht dan blijkt dat aan de toonzuiverheid beter is voldaan dan bij dezelfde stemvork, die door gewonen hameraanslag in

¹⁾ Physical Review. Vol. 21, Series II (1923), p. 692.

trilling is gebracht. Om het verschil na te gaan wordt de volgende proef verricht.

De stemvork g van E d e l m a n n (de loopgewichten zijn niet aangebracht) geeft electrisch aangedreven den grondtoon aan ($n_0 = 192$). Het geluid is zeer krachtig, de amplitude bedraagt ruim 1,5 mm. Vroeger is bij deze stemvork de frequentie van den eersten niet-harmonischen boventoon bepaald (zie tabel 3), deze is 1207 ($6,28n_0$). Deze toon laten we nu weergeven door den toon-generator van Philips, de weergever hiervan wordt in de nabijheid van de stemvork opgesteld. Men neemt nu geen zwevingen waar, ook niet wanneer men het geluid op verschillende plaatsen langs de stemvorkbeenen door auscultatie opvangt. Ook worden geen zwevingen gehoord als men den toon van den toongenerator een weinig hooger of lager maakt.

De eerste niet-harmonische boventoon is dus bij deze electrisch aangedreven stemvork niet naast den grondtoon in het geluid aan te toonen. Hetzelfde geldt voor de tweede dezer boventonen ($12n_0$, de verhouding is hier harmonisch). Daarentegen kan men deze boventonen gemakkelijk aantonen in het geluid van deze zelfde stemvork die door hameraanslag in trilling is gebracht.

Bij stemvorken met nog lageren grondtoon is dit verschil in toonzuiverheid nog grooter. Bij de stemvork G ($n_0 = 96$) werden na krachtigen aanslag met een elastischen hamer in het geluid de volgende boventonen gevonden:

597 ($6,22n_0$)	1171 ($12,2n_0$)	1728 ($18n_0$)
-------------------	--------------------	------------------

Deze niet-harmonische boventonen zijn ook aangetoond bij de stemvork C ($n_0 = 64$), waarbij tevens nog de bovenboventoon $33n_0$ werd waargenomen. De toon $17,3n_0$ werd niet gehoord (vgl. de relatieve toonhoogte in tabel 3).

Bij de stemvork c^2 ($n_0 = 512$) trad naast den grondtoon alleen een boventoon 3380 op ($6,6n_0$).

Het aantal niet-harmonische boventonen dat bij de lagere stemvorken na hameraanslag kon worden aangetoond is dus vrij groot.

Dezelfde stemvorken die hier zijn opgenoemd en ook de andere stemvorken van de reeks van *E d e l m a n n* zijn daarna met het triode-systeem in den grondtoon in trilling gebracht. De amplituden die hierbij zijn bereikt, waren niet kleiner dan die door hameraanslag waren verkregen. Het resultaat was evenals dat bij de stemvork *g* aan het begin van deze § is beschreven: in het geluid werden de niet-harmonische boventonen niet aangetroffen. Als objectieve methode kan men ook van registratie gebruik maken, hoewel deze methode minder gevoelig is dan die welke boven is aangegeven. Ook bij fotografische registratie van deze grondtoontrillingen is steeds weer gebleken, dat bij een zuivere instelling van het aandrijfsysteem in de curve geen boventonen werden geregistreerd.

Bij de stemvorken, die door aandrijving met de triode in den grondtoon in trilling zijn gebracht, zijn de niet-harmonische boventonen naast den grondtoon niet aan te toonen.

Uit het bovenstaande volgt dus tevens dat, ook wanneer het triodesysteem onderbroken wordt, het geluid van de uitklinkende stemvork zuiverder is dan na hameraanslag. Wordt de grondtoontrilling niet langer door de triode onderhouden dan klinkt de stemvork hierin uit: ook hierbij zijn in het geluid de niet-harmonische boventonen niet aangetroffen.

Bij de stemvork is de invloed van de *plaats van den aanslag* op het optreden van den eersten niet-harmonischen hoventoon gemakkelijk te demonstreeren met behulp van enkele *roetcurven*.

Stemvork „V” (steelaanhechting volgens geval 3)

wordt met een hamer van elastisch materiaal aangeslagen. Aan een der beenuiteinden is een schrijvertje van dun celluloid bevestigd, waarmee de trilling in het roet wordt

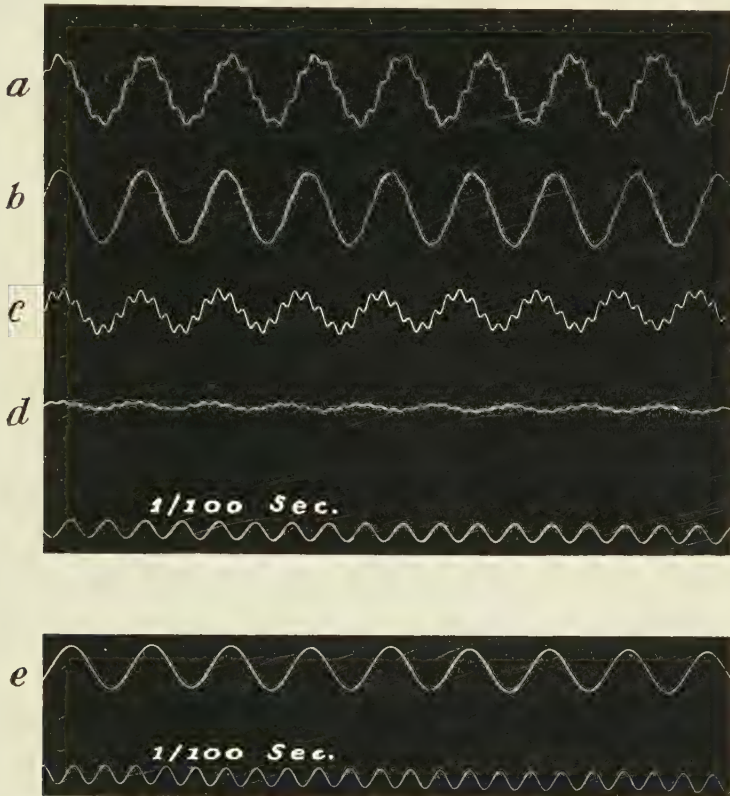


Fig. 19. Roetcurven Stemvork „V”, geval 3.

- a. aanslag beenuiteinde;
- b. aanslag knoop 1e boventoon;
- c. aanslag buik 1e boventoon;
- d. aanslag buik 1e boventoon (knoopen eenigszins gefixeerd);
- e. aandrijving met triode in grondtoon.

geregistreerd. Wordt de stemvork aan het beenuiteinde aangeslagen dan blijkt de curve (fig. 19a) te zijn samengesteld uit grondtoon ($n_0 = 43$) en eersten niet-harmonischen boventoon ($6,4n_0$).

Daarna brengt men den aanslag aan nabij de knoop van dezen boventoon, dit is op $5\frac{1}{2}$ cm vanaf het beenuiteinde (de lengte van het stemvorkbeen is 28 cm). De boventoon komt nu in de grondtoontrilling veel minder tot uiting (fig. 19b).

Daarentegen is de amplitude bij de boventoontrilling zoo groot mogelijk te maken door de stemvork aan te slaan ter plaatse van den buik van dezen boventoon, deze is gelegen op 17 cm vanaf het beenuiteinde. Men verkrijgt nu de curve fig. 19c. Hierin treedt de grondtoon duidelijk naar voren.

De grondtoon treedt het meest op den achtergrond, wanneer men de knopen van dezen niet-harmonischen boventoon eenigszins fixeert door ter hoogte van deze knopen een smal rubberbandje om beide beenen gezamenlijk aan te leggen. Na aanslag ter plaatse van den buik registreert men nu de curve fig. 19d.

Het optreden van den eersten niet-harmonischen boventoon is dus zooveel mogelijk tegengegaan bij de plaats van aanslag die bij fig. 19b is toegepast. Een zuiverder overeenstemming met den sinusvorm verkrijgt men echter als de stemvork door de triodeschakeling in trilling wordt gebracht, waarbij dit systeem nauwkeurig op den grondtoon der stemvork is ingesteld (fig. 19e).

§ 4. *De invloed van de loopgewichten op het optreden der niet-harmonische boventonen.*

Hoe is het nu gesteld met de stemvorken die met loopgewichten zijn belast? De stemvorken van E d e l m a n n waarbij loopgewichten zijn aan te brengen zijn de stemvorken met grondtonen $C_1 - g^2$ (32—768). De toonhoogte wordt nu mede door de plaats van de loopgewichten bepaald en deze is op verschillende punten aan de stemvorkbeenen af te lezen. Het bleek nu dat, wanneer de

stemvorken met de zware loopgewichten waren belast, de niet-harmonische boventonen inderdaad niet in het geluid waren aan te toonen. Ook na zeer krachtigen aanslag werd de eerste dezer boventonen niet gevonden met de methode die in § 3 is vermeld. *Dit geldt echter alleen voor de origineele stemvorken van E d e l m a n n.* Bij de kleinere stemvorkmodellen, die door de oorartsen veelal worden gebruikt, wordt het optreden van den eersten niet-harmonischen boventoon gewoonlijk niet volkomen door de loopgewichten tegengegaan: deze boventoon is bij vele dezer stemvorken gemakkelijk in het geluid aan te toonen. Ook treft men zeer dikwijls stemvorkreeksen aan waarbij de tonen g , c^1 en g^1 worden aangegeven door stemvorken zonder loopgewichten. Bij deze instrumenten kan men ook reeds zonder bepaalde hulpmiddelen de eerste boventoon van den grondtoon onderscheiden. Toch worden deze kleinere stemvorkmodellen dikwijls voor het gehooronderzoek toegepast.

§ 5. *De Harmonische Boventonen.*

De stemvork g ($n_0 = 192$) wordt met het triode-systeem in den grondtoon in trilling gebracht. Met behulp van de tonen van een toongenerator van Philips (§ 3) zijn in het geluid de volgende harmonische boventonen gevonden: $2n_0$, $3n_0$, $4n_0$, $5n_0$ en $6n_0$.

Bij de stemvorken G en c konden naast den grondtoon de harmonische boventonen tot en met den zesden ($7n_0$) worden aangetoond en bij de stemvork c^2 tot en met den vierden.

Deze stemvorken zijn daarna door aanslag met een hamer in trilling gebracht: nu werden dezelfde harmonische boventonen aangetroffen die ook bij de trilling door aandrijving zijn aangegeven.

Vervolgens zijn aan deze stemvorken de loopgewichten vlg. E d e l m a n n aangebracht: het bleek, dat het op-

treden der harmonische boventonen hierdoor niet werd verhinderd. Naast den grondtoon werd niet alleen het octaaf (als door S c h m i d t-H a c k e n b e r g ¹⁾) is aangetoond) maar een reeks dezer tonen gevonden, evenals hierboven is aangegeven voor de stemvorken die niet waren belast.

De harmonische boventonen treden op zoowel bij de stemvork die door aanslag als ook bij de stemvork die door aandrijving met behulp van de triode in trilling is gebracht.

Het aanbrengen van zware loopgewichten vlg. E d e l m a n n verhindert het optreden van het octaaf en hogere harmonische boventonen niet.

Geeft de stemvork door aandrijving den grondtoon aan, dan kan men in het geluid dat men waarneemt den grondtoon uitdooven door auscultatie op twee plaatsen vlg. L i n d i g (Hoofdst. I). In het geluid is nu niet alleen het octaaf (zooals bij de proeven van L i n d i g), maar zijn ook de overige harmonische boventonen aan te toonen, die hierboven zijn aangegeven. Men vindt deze tonen op alle plaatsen in de lucht naast de stemvorkbeenen.

Daarentegen heb ik bij de registraties van de trillingen, die in het stemvorkbeen zelf optreden, het octaaf en de andere harmonische boventonen nooit in de registratie-curve aangetroffen ²⁾.

Ook is het met behulp van het aandrijfsysteem niet mogelijk gebleken het octaaf als afzonderlijke boventoontrilling te doen optreden, zooals dat wel mogelijk is bij

¹⁾ Passow-Schaefer's Beitr. Bd. 13 (1920) p. 50.

²⁾ Ook in den laatsten tijd wordt deze meening nog niet door alle onderzoekers gedeeld. Zoo vermelden P a r a m e s w a r a n en S u b a r a y a (Proc. Ind. Sci. Congress, 1931), dat de eigen trilling van de stemvork het octaaf zeker bevat en mogelijk ook nog de derde harmonische boventoon. Dit wordt tegengesproken door T i r u n a r a y a n s c h a r (Rev. Scient. Instr., Vol. 3, 1932, p. 769), die deze tonen in de registratiecurven niet heeft kunnen aantonen.

de niet-harmonische boventonen. *Stelt men den triode-generator in op de frequentie van het octaaf dan geraakt de stemvork niet in trilling. Hieruit kan men de gevolgtrekking maken dat de harmonische boventonen in wezen geen eigen trillingen van de stemvork zijn.*

De niet-harmonische boventonen zijn trillingen die in de stemvork zelf optreden.

Tot dusverre is alleen sprake geweest van de harmonische boventonen, die naast den grondtoon optreden. *Echter geeft ook elke niet-harmonische boventoon weer aanleiding tot het ontstaan van een bijbehorende reeks harmonische boventonen.*

Men heeft hiermee practisch alleen te maken bij de krachtige boventoontrilling $6,28n_0$. Wordt een stemvork met grondtoon G of c krachtig aangeslagen, dan is het octaaf van dezen niet-harmonischen boventoon gemakkelijk in de lucht naast het stemvorkbeen aan te toonen.

Veel beter gelukt het deze tonen te vinden wanneer men met behulp van de triode één der niet-harmonische boventonen als afzonderlijke trilling laat optreden. Het blijkt nu, dat harmonische boventonen ontstaan, zoowel bij de trillingswijze met een even aantal knopen, als ook bij de trillingswijze waarbij in de stemvork een oneven aantal knopen wordt gevormd. Ze treden dus ook op als de bewegingen van beide beenen in dezelfde richting plaats vinden.

§ 6. *Samengestelde trillingen.*

In sommige gevallen, waarop we hier niet nader ingaan, bleek het mogelijk een zoodanige instelling van het triodesysteem te vinden, dat in de stemvorktrilling naast den grondtoon een bepaalde boventoon optrad. Hiervan zijn twee voorbeelden gegeven in Fig. 20 en Fig. 21.

In de trilling, die in Fig. 20 is voorgesteld, is naast den grondtoon de eerste niet-harmonische boventoon opgetreden. De toonhoogte in verhouding tot den grondtoon (n_0) bedraagt hier $6,25n_0$. De verschuiving van de boventoon toppen over de grondtooncurve is nu goed te zien: na 4 grondtoontrillingen treedt weer dezelfde phaseverhouding op.

De trilling die in Fig. 21 is weergegeven is een combinatie van grondtoon en derden niet-harmonischen boventoon bij de stemvork „V”, geval 2 (zie § 1 van dit hoofdstuk). Hierbij is de toonhoogteverhouding tot den grondtoon $18.4 n_0$. Het bijzondere van deze samengestelde

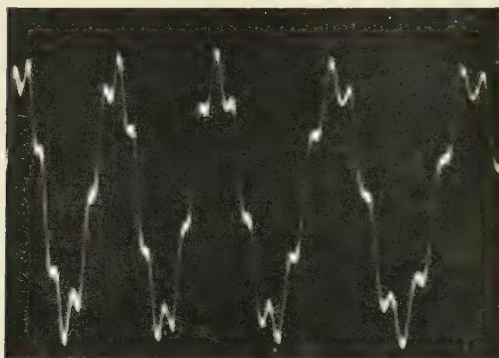


Fig. 20. Stemvork „K. M.”.
Grondtoon en boventoon $6,25 n_0$.



Fig. 21. Stemvork „V”; geval 2. Grondtoon en boventoon $18,4 n_0$.

trilling is dat de boventoon $6,25 n_0$ hierbij ontbreekt. Wordt de stemvork door aanslag in trilling gebracht dan ontbreekt deze boventoon niet, maar treedt met grooter geluidsintensiteit op dan de toon $18,4 n_0$.

HOOFDSTUK V.

SAMENVATTING.

In dit proefschrift wordt een methode beschreven waarbij stemvorken in trilling worden gebracht door middel van een triode-generator. Het blijkt daarmee mogelijk de stemvork ofwel in den grondtoon, dan wel in een willekeurigen boventoon in onderhouden en enkelvoudige trilling te krijgen. Met behulp van deze methode kan men elk der niet-harmonische boventonen afzonderlijk doen optreden. Voor de harmonische boventonen blijkt dit niet mogelijk te zijn: wordt het triode-aandrijfsysteem ingesteld op het octaaf of één der andere harmonische boventonen dan geraakt de stemvork niet in trilling. Hieruit kan men de gevolgtrekking maken dat de harmonische boventonen geen eigen trillingen van de stemvork zijn, maar dat ze in de lucht ontstaan. Ook als een stemvork door aanslaan in trilling wordt gebracht is het octaaf bij de registratie van de stemvorktrilling niet aan te toonen.

Bij elk der niet-harmonische boventonen werd de toonhoogte bepaald en de ligging der knooppunten vastgesteld. De uitkomsten worden vergeleken met de resultaten van vroegere onderzoekers. Bij deze proeven zijn ook U-vormig omgebogen staven onderzocht. Hierbij is de steelaanhechting op drie verschillende wijzen uitgevoerd:

1e. de steel is aangehecht in het midden van de ombuiging.

2e. de steel is aangehecht in de beide knooppunten van den grondtoon: de boventonen waarbij tusschen deze plaatsen een knoop wordt gevormd kunnen nu niet optreden.

3e. tusschen steel en omgebogen staaf is een z.g.

„hart" aangebracht. De uitkomsten komen hier overeen met die bij de stemvorken van K ö n i g en E d e l m a n n zijn gevonden.

De niet-harmonische boventonen zijn in twee groepen te verdeelen, nl. die, waarbij de beenen t.o.v. elkaar in tegengestelde richting bewegen en die, waarbij de bewegingen van beide beenen in dezelfde richting plaats vinden. Het aantal knopen is bij de eerstgenoemde groep even, bij de laatstgenoemde oneven.

Er wordt een methode aangegeven waarbij deze trillingsrichting voor elk dezer boventonen objectief kan worden aangetoond door registratie der trillingen van beide beenen.

Deze trillingswijze is ook door auscultatie aan te toonen met de methode vlg. L i n d i g.

Het verschil in trillingswijze brengt mee dat de interferentievlakken bij beide groepen een verschillend verloop vertoonen.

In het gebied tusschen grondtoon (n_0) en z.g. eersten boventoon ($6,28n_0$) werd een boventoon met 3 knopen gevonden, welke ook geregistreerd is. Hierbij zijn de bewegingen aan beide beenen gelijk gericht. Het bleek echter dat deze toon als een z.g. staaf- of steeltoon moest worden opgevat, daar hier de steellengte van invloed is op de toonhoogte. Dit verklaart ook waarom bij dezen toon de relatieve toonhoogte bij de verschillende stemvorkmodellen zooveel uiteenloopt ($2,5n_0—4n_0$), terwijl bij de andere boventonen steeds een vrij constante verhouding tot den grondtoon werd aangetroffen.

Bij verschillende stemvorken zijn bij het samengestelde geluid toonhoogtebepalingen verricht met behulp van de zwevingen die kunnen ontstaan door superpositie met de tonen van een geijkten toongenerator.

Zijn bij de origineele stemvorken van E d e l m a n n de zware loopgewichten aangebracht dan zijn de niet-

harmonische boventonen in het geluid niet aan te toonen. Deze loopgewichten verhinderen echter het optreden der harmonische boventonen niet: het octaaf en ook nog hogere harmonische boventonen kunnen hierbij worden aangetoond.

Bij de kleine stemvorkmodellen die door de oorartsen veelal worden gebruikt, wordt het optreden van den eersten niet-harmonischen boventoon gewoonlijk niet volkomen door de loopgewichten tegengegaan. Ook zijn hierbij de stemvorken g , c^1 en g^1 meestal zonder loopgewichten uitgevoerd, zoodat de eerste niet-harmonische boventoon hier zeer gemakkelijk kan worden waargenomen.

Is het aandrijfsysteem nauwkeurig op den grondtoon van een stemvork ingesteld dan zijn in het geluid de niet-harmonische boventonen niet aan te toonen. Ook de registratiecurve bleek deze niet te bevatten. Deze trilling blijkt in groote mate enkelvoudig te zijn.

Daarentegen blijkt de trilling steeds zeer samengesteld te zijn als men een stemvork in trilling brengt door haar met een hamer aan te slaan. Ook is dit nog het geval als men den aanslag aanbrengt ter plaatse van de knoop van den eersten niet-harmonischen boventoon (registratie).

Uit hetgeen in dit proefschrift is vermeld, mag men wel de gevolgtrekking maken, dat de methode van het in trilling brengen van stemvorken door middel van een triode-generator ook voor het verdere onderzoek van stemvorktrillingen nog meerdere resultaten kan geven.
